

Narayana Saniele Massocco

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE
SOLOS RESIDUAIS COM ÊNFASE NA MECÂNICA DOS
SOLOS NÃO SATURADOS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Orlando Martini de
Oliveira, Dr.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Massocco, Narayana Saniele

Determinação dos parâmetros geotécnicos de solos
residuais com ênfase na mecânica dos solos não saturados /
Narayana Saniele Massocco ; orientador, Orlando Martini de
Oliveira - Florianópolis, SC, 2017.

238 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Resistência ao cisalhamento de
solos não saturados. 3. Superfície de ruptura. 4. Amostra
indeformada. 5. Curva de retenção. I. Oliveira, Orlando
Martini de. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Narayana Saniele Massocco

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE
SOLOS RESIDUAIS COM ÊNFASE NA MECÂNICA DOS
SOLOS NÃO SATURADOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.

Florianópolis, 15 de Março de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Fernando Antônio Medeiros Marinho, Phd.
Universidade de São Paulo (Videoconferência)

Prof.^a Liseane Padilha Thives, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus
queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus queridos pais: Jerdino e Idineis pela paciência, amizade e ajuda durante toda esta minha vida.

Agradeço ao Professor Orlando Martini de Oliveira pela ajuda, orientação.

Aos meus colegas de pesquisa Gabriel Bellina Nunes, Leonardo e Ana Clara Ferreira pela ajuda em campo e laboratório, deixo minha gratidão.

A Sandra Dartora, pelo apoio terapêutico, meu muito obrigada.

A CAPES pela bolsa e apoio financeiro, meus agradecimentos. À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) meu muito obrigada.

“O desenvolvimento da ciência não se efetua por acumulação dos conhecimentos, mas por transformação dos princípios que organizam o conhecimento. A ciência não se limita a crescer, mas em transforma-se.”

Thomas Khun

RESUMO

A mecânica dos solos é dividida em dois ramos de estudos: solos saturados e não saturados. Os solos não saturados, são característicos de regiões tropicais, e se diferenciam dos solos saturados por apresentarem em sua estrutura: a fase ar e a membrana contrátil. Essas estruturas interferem no comportamento geotécnico e estão relacionadas à variável de estado de tensão denominada sucção. Devido à pouca exploração desta linha de pesquisa no estado de Santa Catarina, este trabalho concentra-se em determinar parâmetros geotécnicos de dois solos residuais da Ilha de Santa Catarina, com ênfase na mecânica dos solos não saturados. A pesquisa investiga a influência da sucção no comportamento geotécnico de dois solos, pertencentes a diferentes formações geológicas, através de ensaios de laboratório em amostras indeformadas de campo, e assim, para se ter maior detalhe do perfil estudado, realizou a caracterização desses dois solos com amostras deformadas até uma profundidade de 2,10 m. Com as amostras indeformadas foram obtidos a curva de retenção do solo, e encontrado sucções nos moldes indeformados, pelo método do papel filtro e, desse modo ensaiado no equipamento de cisalhamento direto, com tensões líquidas de 50, 100, 200 e 300 kPa. Desse modo, foi possível obter tensão normal líquida, tensão cisalhante e sucção para cada molde de cisalhamento. Esses dados foram suficientes para a formação de uma superfície de ruptura para cada solo, onde foi possível analisar o comportamento dos dois solos não saturados. Para a formação da superfície, a função polinomial foi a que mais se adequou aos dados experimentais. A partir desta função, curva de retenção e dados obtidos, foi possível fazer análises e comparar com estudos da literatura e verificar a representatividade da curva de retenção em solos indeformados. Observou que estes solos se adequam a uma característica não linear. Os valores de ϕ^b baixos e sempre menores que ϕ' mostraram que para estes solos, o incremento de resistência é mais efetivo devido as tensões líquidas aplicadas, apesar de ocorrer um acréscimo de resistência com o aumento de sucção. Por fim, com a junção deste estudo e dados, foi possível dar início a formação de um banco de dados, que podem ser utilizados para análise de encostas e taludes no Município de Florianópolis –SC.

Palavras-chave: Superfície de ruptura, curva de retenção, sucção, amostra indeformada, resistência ao cisalhamento de solos não saturados, papel filtro.

ABSTRACT

Theoretical Soil mechanics is divided into two kinds of study: saturated and unsaturated soils. Unsaturated soils are characteristic of tropical places, and are distinguished from saturated soils by their structure: the air phase and contractile membrane. These structures interfere in the geotechnical behavior and they are related with the stress state variable called suction. Due to the small exploration of this line research in the state of Santa Catarina (Brazil), this research focuses on the geotechnical determination of two residual soils from undeformed data samples of Santa Catarina Island, with the mechanics of unsaturated soils. The research investigated the influence of suction on the geotechnical behavior of two soils, belonging to different geological formations, through laboratory tests in field samples, and thus, for the greater detail, characterize of the two soils with deformed samples were performed for a depth of 2.10 m. Soil-water characteristic curves was obtained with the undeformed soil samples. In this way, it was possible to obtain normal stress, shear stress and suction for each sample. These data were necessary for a formation of a rupture surface for each one soil sample, where the behavior of the two unsaturated soils was analyzed. For the formation of the surface, the polynomial function was the most suitable for the experimental data. Joining this function, with the soil-water characteristic and the data, it was possible to compares with researches on the literature studies and verify the representativeness of the retention curve in undisturbed soils. We observed that these soils fit a non-linear characteristic. The values of ϕ^b were lower ϕ' and show for these soils that the increase of resistance is more effective due tension stress state, although happen an increase of resistance with the increase of suction. Finally, with a combination of this study and data, it was possible to start the a database formation, which can be used for analysis of slopes and engineering activities in the Municipality of Florianópolis -SC.

Keywords: retention curve, suction, undisturbed sample, resistance to unsaturated soils shear, envelope of rupture, filter paper.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fator de segurança com relação a duração da chuva e frente de saturação	27
Figura 2 – Relação da precipitação com a sucção em uma determinada profundidade e época do ano	28
Figura 3 – Estrutura da Dissertação	31
Figura 4 – Tópicos resumidos da Revisão Bibliográfica	33
Figura 5 – Visualização da Mecânica dos Solos mostrando o papel da condição de fluxo de água.....	34
Figura 6 – Pressão em relação ao nível d'água em um tubo	36
Figura 7 – Representação conceitual de sucção total, matricial e osmótica.....	37
Figura 8 – A sucção matricial em solo não saturado com seus efeitos	38
Figura 9 – Variação da sucção no campo a 1m de profundidade com medidas de precipitação.....	40
Figura 10 – Perfil de umidade do solo	41
Figura 11 – Curva de Retenção e a estrutura do solo.....	43
Figura 12 –A Curva de Retenção.....	44
Figura 13 – Curva de Retenção e a estrutura do solo.....	45
Figura 14 – Curvas Característica de diversas areias	46
Figura 15 – Curvas de retenção de solo compactado a umidade ótima.....	47
Figura 16 – Curvas de retenção de solo compactado na umidade ótima.....	50
Figura 17 – Categorização do solo com a variação de umidade	52
Figura 18 – Curva de Retenção e a estrutura do solo.....	53
Figura 19 – Elemento de solo e os estados de tensões	55
Figura 20 – Envoltória de Resistência de Solos não saturados e suas projeções.....	58
Figura 21 – Superfície planar de uma região de Singapura	59
Figura 22 – Análises sugeridas para as envoltórias não lineares	61
Figura 23 – Diferentes interpretações de tensão cisalhante versus sucção.....	62
Figura 24 – Relação entre curva característica e envoltória de resistência ao cisalhamento	63
Figura 25 – Diferentes interpretações de tensão cisalhante versus sucção.....	64
Figura 26 – Influência da sucção no ângulo de atrito (ϕ')	65
Figura 27 – Variação de ϕ_b/ϕ' em relação a sucção	67
Figura 28 – Envoltória de Resistência de Solos não saturados e suas projeções.....	68
Figura 29 – Superfície da envoltória de resistência de solos não saturados.....	69
Figura 30 – Representação de envoltória não saturada multilinear.....	70
Figura 31 – Envoltória de Resistência de Solos não saturados e suas projeções.....	72
Figura 32 – Tipos de fluxos do solo para o papel filtro	76
Figura 33 – Gráfico das curvas de calibração para o papel filtro Whatman nº 42	78
Figura 34 – Esquema do cisalhamento com sucção controlada	80
Figura 35 – Pontos amostrais de estudo.....	84
Figura 36 – Indicação do local de estudo no bairro Itacorubi (Área 1).....	85

Figura 37 – Imagem do dique de diabásio com indicação de afloramento de água pelas fraturas da rocha (Área 1)	86
Figura 38 – Vista lateral do corte execução para construção (Área 1).....	86
Figura 39 – Indicação do ponto de coleta de amostras do solo residual de diabásio (Área 1)	88
Figura 40 – Indicação do local de retirada de amostras de solo residual de granito (Área 2)	89
Figura 41 – Indicação do local de estudo no bairro Cacupé (Área 2)	90
Figura 42 – Residual de granito- Área 2.....	91
Figura 43 – Indicação do ponto de coleta do solo residual de granito no mapa geológico	92
Figura 44 – Fluxograma resumido.....	93
Figura 45 – Fluxograma Completo.....	94
Figura 46 – Fluxograma etapa 1	95
Figura 47 – Etapa de reconhecimento da área de estudo – Itacorubi (Área 1)...	96
Figura 48 – Etapa de reconhecimento da área de estudo – Cacupé (Ponto 2)....	97
Figura 49 – Coleta de amostra – Itacorubi (Área 1)	98
Figura 50 – Coleta de amostras – Cacupé (Ponto 2).....	99
Figura 51 – Destinação do solo indeformado coletado no bairro Itacorubi (Ponto 1)	100
Figura 52 – Destinação do solo indeformado coletado no bairro Cacupé (Ponto 2)	101
Figura 53 – Fluxograma etapa 2	102
Figura 54 – Caracterização do solo – Itacorubi	103
Figura 55 – Caracterização do solo – Fluxograma	104
Figura 56 – Imagens dos ensaios de caracterização e índices físicos	105
Figura 57 – Fluxograma para cálculo da massa do corpo de prova saturado...	106
Figura 58 – Regularização da superfície do corpo de prova para utilização da técnica do papel filtro	107
Figura 59 – Técnica do Papel Filtro	108
Figura 60 – Procedimentos utilizados nos ensaios de cisalhamento direto.....	110
Figura 61 – Representação índices físicos obtidos nos moldes	111
Figura 62 – Indicação dos critérios de ruptura para diferentes formatos de curva	113
Figura 63 – Preparação e execução do ensaio de cisalhamento direto.....	114
Figura 64 – Fluxograma etapa 3	115
Figura 65 – Formação da curva de retenção da água – <i>Soil Vision</i>	116
Figura 66 – Formação da superfície de ruptura do solo.....	117
Figura 67 – Hipóteses e Previsões	119
Figura 68- Caracterização do solo com a variação da profundidade Solo Residual de Diabásio.....	125
Figura 69 - Caracterização Solo Residual de Granito por profundidade	126
Figura 70 – Granulometria do solo Residual de diabásio	127
Figura 71 – Porcentagem de solo por profundidade - Residual de diabásio.....	128
Figura 72 - Granulometria Solo Residual de granito	129

Figura 73 – Porcentagem de solo por profundidade – residual de granito	130
Figura 74 - Dados experimentais obtidos do corpo de prova - residual de diabásio.....	131
Figura 75 - Dados experimentais obtidos do corpo de prova residual de granito	132
Figura 76 – Ensaio de cisalhamento direto– estágio 1: 50kPa – Residual de diabásio.....	140
Figura 77 – Ensaio de cisalhamento direto – estágio 2:100kPa – Residual de diabásio.....	141
Figura 78 – Ensaio de cisalhamento direto – estágio 3:200 kPa – Residual de diabásio.....	142
Figura 79 – Ensaio de cisalhamento direto– estágio 4:300kPa – Residual de diabásio.....	143
Figura 80 – Ensaio de cisalhamento direto – estágio 1: 50 kPa – Residual de Granito.....	144
Figura 81 – Ensaio de cisalhamento direto– estágio 2: 100 kPa – Residual de granito	145
Figura 82 – Ensaio de cisalhamento direto– estágio 3: 200 kPa – Residual de granito.....	146
Figura 83 – Ensaio de cisalhamento direto – estágio 4: 300kPa – Residual de granito.....	147
Figura 84 – Reta obtida na condição inundada para o solo residual de diabásio	148
Figura 85 – Reta obtida na condição inundada para o solo residual de granito.....	148
Figura 86 – Curva de Retenção solo residual de diabásio.....	151
Figura 87 – Curva de Retenção solo residual de granito.....	153
Figura 88 – Curva de Retenção do solo com as equações de ajuste.....	154
Figura 89 – Pontos experimentais dos ensaios de cisalhamento direto com medida da sucção inicial – Residual de diabásio	158
Figura 90 – Pontos experimentais dos ensaios de cisalhamento direto com medida da sucção inicial – Residual de granito	159
Figura 91 – Superfície de ruptura – Residual de diabásio.....	160
Figura 92 – Superfície de ruptura – Residual de granito.....	161
Figura 93 – Planos da superfície de ruptura - Solo Residual de diabásio	163
Figura 94 – Planos da superfície de ruptura - Solo Residual de granito	164
Figura 95 – Valores de ϕ_b - Solo Residual de diabásio.....	166
Figura 96 – Valores de ϕ_b - Solo Residual de granito.....	167
Figura 97 – Influência do Ângulo de atrito com o aumento de sucção – tensão líquida 200kPa	169
Figura 98 – Curva de retenção com valores de entrada de ar.....	171
Figura 99 – Representatividade da Curva de retenção – Residual de diabásio	173
Figura 100 – Representatividade curva de retenção- Residual de granito	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações de ajuste para a curva de retenção.....	48
Tabela 2 – Possíveis combinações de variáveis de estado de tensão para solos não saturados	54
Tabela 3 – Pesquisas com relação resistência x sucção não linear	60
Tabela 4 – Métodos de medida de sucção.....	74
Tabela 5 –Sugestão para tempo de equilíbrio para medição de sucção total em função do nível de sucção.....	77
Tabela 6 –Curvas de calibração para papéis Whatman n° 42 e Schleicher e Schuell n° 589.....	77
Tabela 7 - Caracterização por profundidade residual de diabásio.....	123
Tabela 8 –Caracterização por profundidade residual de granito	124
Tabela 9 - Porcentagem de solo por profundidade residual de diabásio	128
Tabela 10 – Porcentagem de solo por profundidade residual de granito	129
Tabela 11 – Dados de experimentais e índices físicos do bloco para obtenção da curva de retenção – Residual de diabásio	134
Tabela 12 – Dados experimentais e índices físicos do bloco para obtenção da curva de retenção – Residual de granito	135
Tabela 13 – Dados de sucção e índices físicos dos moldes para cisalhamento – Residual de diabásio	137
Tabela 14 – Dados de sucção e índices físicos dos moldes de cisalhamento – Residual de granito	138
Tabela 15 – Dados experimentais de sucção e umidade volumétrica – Residual de diabásio	149
Tabela 16 – Coeficientes obtidos pelo software <i>Soil Vision</i> – Residual de diabásio.....	150
Tabela 17 – Dados experimentais de sucção e umidade volumétrica –Residual de granito	152
Tabela 18 – Coeficientes obtidos pelo software <i>Soil Vision</i> Residual de granito	152
Tabela 19 – Dados de entrada –Residual de diabásio	155
Tabela 20 – Dados de entrada –Residual de granito	157

SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

a	parâmetro de ajuste.....	[Adimensional]
c	Coesão do solo.....	[kPa]
m	Parâmetro de ajuste.....	[Adimensional]
ml	Molaridade.....	[Adimensional]
n	Parâmetro de ajuste.....	[Adimensional]
hc	Altura da coluna do tensiômetro.....	[m]
rh	umidade relativa	[Adimensional]
Sm	Sucção matricial	[L ² ·T ²]
$Sosm$	Sucção osmótica	[L ² ·T ²]
St	Sucção total	[L ² ·T ²]
Sc	Sucção capilar.....	[L ² ·T ²]
$Sads$	Sucção de adsorção.....	[L ² ·T ²]
Sr	Grau de saturação	[%]
u_w	Poropressão, pressão neutra.....	[kPa]
w	Teor de umidade gravimétrico.....	[%]

Alfabeto Grego

χ	Parâmetro de ajuste Bishop	[Adimensional]
γ_w	Peso específico da água	[kN·m ⁻³]
Θ	Umidade volumétrica	[%]
θ_s	Umidade volumétrica da saturação	[%]
θ'_s	Umidade volumétrica de umedecimento.....	[%]
θ_r	Umidade volumétrica residual	[%]
Ψ	Sucção total	[kPa]
Ψ_r	Sucção devido a umidade volumétrica residual	[kPa]
σ	Tensão total do solo	[kPa]
σ'	Tensão vertical efetiva do solo	[kPa]
$(u_a - u_w)$	Sucção matricial	[kPa]
$(\sigma - u_a)$	Tensão normal líquida	[kPa]
τ	Tensão cisalhante.....	[kPa]
ϕ	Ângulo de atrito interno das partículas em relação as tensões normais [graus]	
ϕ'	Ângulo de atrito interno das partículas em relação as tensões normais [graus]	
ϕ_b	Ângulo de atrito interno das partículas com relação a sucção do solo [graus]	
ϕ_t	Potencial total da água no solo	[L ² ·T ²]
ϕ_g	Potencial gravitacional da água no solo.....	[L ² ·T ²]

ϕ_{osm}	Potencial osmótico da água no solo [L ² ·T ²]
ϕ_m	Potencial matricial da água no solo..... [L ² ·T ²]
χ	Parâmetro que representa a condição de saturação [Adimensional]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

MCT – Miniatura Compactado Tropical

NBR – Norma Brasileira Registrada

PPGEC – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil

SC401 – Rodovia 401 em Santa Catarina

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

VEA – Valor de entrada de ar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	26
1.2 OBJETIVOS	29
1.2.1 Objetivo Geral.....	29
1.2.2 Objetivos Específicos	30
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	34
2.2 DEFINIÇÃO DE SUCCÃO	35
2.3 CURVA DE RETENÇÃO	41
2.3.1 Interferência no formato da curva	44
2.3.2 Equações de ajuste para curva de retenção	47
2.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO SATURADOS.....	51
2.4.1 Estrutura e o estado de tensões em solo não saturado	51
2.4.2 Equações de resistência ao cisalhamento não saturado	55
2.4.3 Envoltória de resistência não saturada	57
2.5 ENSAIOS LABORATORIAIS	73
2.5.1 Medição de sucção no solo.....	73
2.5.1.1 Técnica do Papel Filtro.....	75
2.5.2 Ensaio de Resistência com medida de sucção	79
3 ÁREAS DE ESTUDO.....	83
3.1 ÁREA DE ESTUDO 1: ITACORUBI.....	85
3.2 ÁREA DE ESTUDO 2: CACUPÉ.....	89
4 MATERIAIS E MÉTODO	93
4.1 ETAPAS DE CAMPO.....	95
4.1.1 Reconhecimento da área.....	95
4.1.2 Coleta de amostras.....	98
4.2 ENSAIOS LABORATORIAIS	102
4.2.1 Caracterização do solo.....	103

4.2.2 Utilização da Técnica do Papel Filtro	105
4.2.3 Imposição de sucção nos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto.....	108
4.2.4 Cisalhamento Direto com sucção.....	112
4.3 APLICAÇÃO DE <i>SOFTWARE</i>	114
4.3.1 Curva de Retenção – <i>Soil Vision</i>	115
4.3.2 Superfície de ruptura	116
4.4 ANÁLISES	117
5 RESULTADOS	121
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS	121
5.2 DADOS EXPERIMENTAIS PAPEL FILTRO – CORPO DE PROVA ...	130
5.3 DADOS DE IMPOSIÇÃO DE SUCÇÃO NOS MOLDES.....	136
5.4 DADOS DE RESISTÊNCIA COM SUCÇÃO.....	139
5.5 DEFINIÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO.....	149
5.6 DEFINIÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA	155
5.7 ANÁLISES.....	162
5.7.1 Linearidade	162
5.7.2 Relação do ângulo ϕ_b e ϕ'	165
5.7.3 Variação do ângulo ϕ' com o aumento de sucção.....	168
5.7.4 Relação entre a curva de retenção e envoltória de resistência	170
5.7.5 Representatividade da curva de retenção de solo indeformado.....	171
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	175
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	177
REFERÊNCIAS	178
APÊNDICE A	186
APÊNDICE B.....	214

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da mecânica dos solos, os estudos são voltados às condições do terreno saturado ou seco. Isto se deve a pesquisas realizadas originalmente em regiões de clima temperado, onde ocorrem, frequentemente, solos saturados. Porém que cerca de 60% da população mundial vive em regiões áridas (FREDLUND, 1996), onde a evaporação excede as precipitações anuais, merecendo, portanto, atenção aos solos não saturados.

É comum não se considerar o comportamento não saturado dos solos nos projetos, o que pode resultar em custos excedentes e prejuízos, principalmente em encostas e taludes que não são atingidos pelo lençol freático. Essas situações requerem um entendimento maior das suas características de drenagem, deformabilidade e resistência.

As correlações de análise de resistência propostas por Terzaghi são insuficientes quando analisadas para os solos que estão acima do nível d'água. A presença de ar e de uma pressão negativa nos poros, conhecida como sucção; são os principais fatores de alteração do comportamento geomecânico dos solos. Essas mudanças podem ser suficientes para estabilizar um talude natural, a partir de um acréscimo na resistência, ou de forma inversa, desestabilizar, a partir de uma diminuição em sua resistência.

A consideração da sucção, como uma nova variável de estado de tensões, é fundamental para o entendimento do comportamento geotécnico de muitas obras de engenharia civil. Os aterros, utilizados para a construção de rodovias, barragens de terra, obras de terraplanagem e barreiras capilares, entre outros tipos de construção, podem permanecer durante toda a sua via útil, na condição não saturada. Os movimentos de massa em encostas, por exemplo, podem estar relacionados apenas a variação do perfil de sucção do solo. Assim, a estabilidade desses taludes, pode ser melhorada ampliando os estudos sobre a condição não saturada dos terrenos. Desse modo, o conhecimento do comportamento geomecânico de diversas obras (resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade) só poderá ser bem compreendido com a consideração da fundamentação teórica da mecânica dos solos não saturados.

Os solos residuais tropicais têm recebido importante atenção nas pesquisas por serem muito comuns no Brasil. Assim, o presente trabalho pretende ampliar esses estudos, analisando a sucção e os parâmetros de resistência de dois perfis de solos residuais não saturados, coletados em duas áreas diferentes de Florianópolis – SC.

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Um dos questionamentos sobre mecânica dos solos não saturados é a consideração da influência da sucção nas propriedades mecânicas. Analisando a variação da precipitação, e consequentemente da sucção, consegue-se determinar uma faixa de valores típicos de atuação dessa pressão, contribuindo para o melhor conhecimento do comportamento não saturado do solo.

A contribuição da sucção à resistência dos solos é de grande valia, e, tem contribuído para o melhor conhecimento do solo; pois um bom entendimento do estado de tensões do solo, da interação solo estrutura e da variação da saturação do perfil do solo durante a construção e vida útil de uma estrutura, são fatores essenciais para uma melhor compreensão e dimensionamento (FREDLUND, 2006).

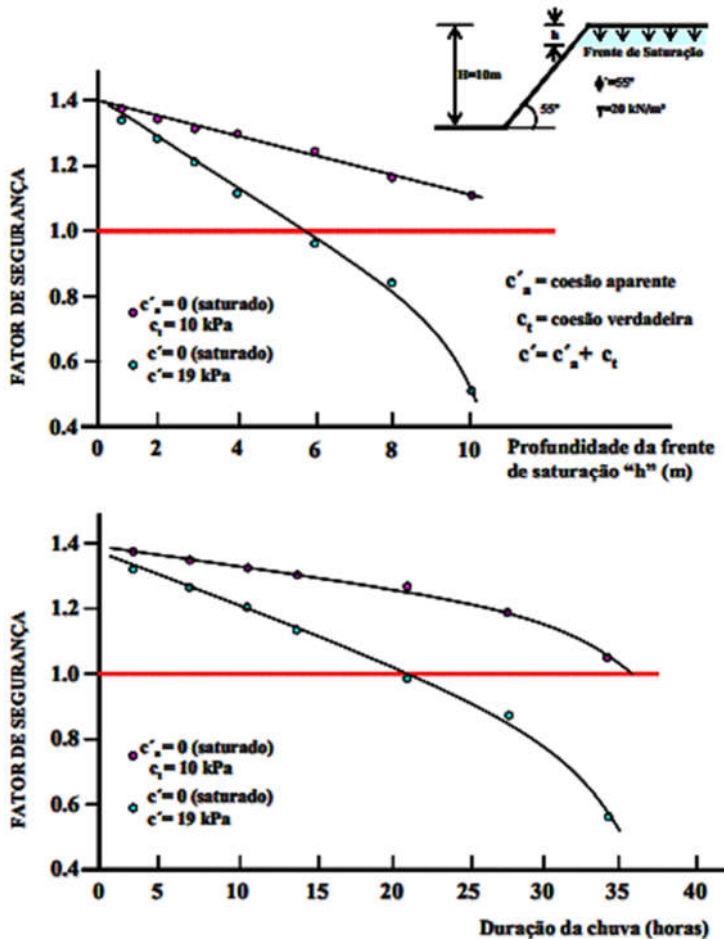
Com isso, a variação da resistência ao cisalhamento do solo ao longo da profundidade, associado a um perfil de sucção, tem sido demonstrada em várias pesquisas. Rahardjo et al. (1995) demonstraram a importância da sucção matricial na estabilidade de taludes em um solo residual de Cingapura, onde deslizamentos são comuns. Observaram que as precipitações que ocorrem durante o ano modificam o perfil de sucção tendo sido encontrado valores de ϕ^b (ângulo de atrito em relação a tensão cisalhante *versus* sucção) igual a 26° .

É possível perceber que esses fatores auxiliam no acréscimo e redução do fator de segurança. Yong et al. (1982), apresentaram uma pesquisa em que houve redução do fator de segurança de um talude devido às variações na duração da chuva (de intensidade igual a permeabilidade saturada). Na Figura 1 estão apresentados alguns resultados de análises representados pelo fator de segurança *versus* profundidade alcançada pela “frente de saturação” e duração de chuva, neste exemplo a ruptura ocorre em 20 horas no primeiro caso e após 36 horas no outro caso.

Estudos atuais de Severo et al. (2015), fizeram análises das condições de estabilidade das Falésias na Área onde está instalado um resort no Rio Grande do norte, onde a condição de não saturação é predominante. A partir das análises de estabilidade verificou-se que durante a estação de seca, quando o solo apresenta baixo grau de saturação o fator de segurança varia entre 1,3 e 1,7, enquanto que para a condição de saturação o fator varia entre 1,1 e 1,2, o que indica que o talude apresenta marginalmente estável. Para evitar problemas de saturação recomendou-se o monitoramento da falésia e foram implementadas medidas de mitigação.

Diemer (2014), com dados experimentais de um solo tropical, localizado em Goiás, fez uma análise de um talude de 4 metros na condição não saturada, verificou o quanto é importante considerar o perfil de sucção do solo quando vai projetar qualquer obra geotécnica. Isto foi observado pela diferença no Fator de segurança e discretização das camadas onde passou de 5,57 para 1,018 na condição de umidade natural e condição inundada.

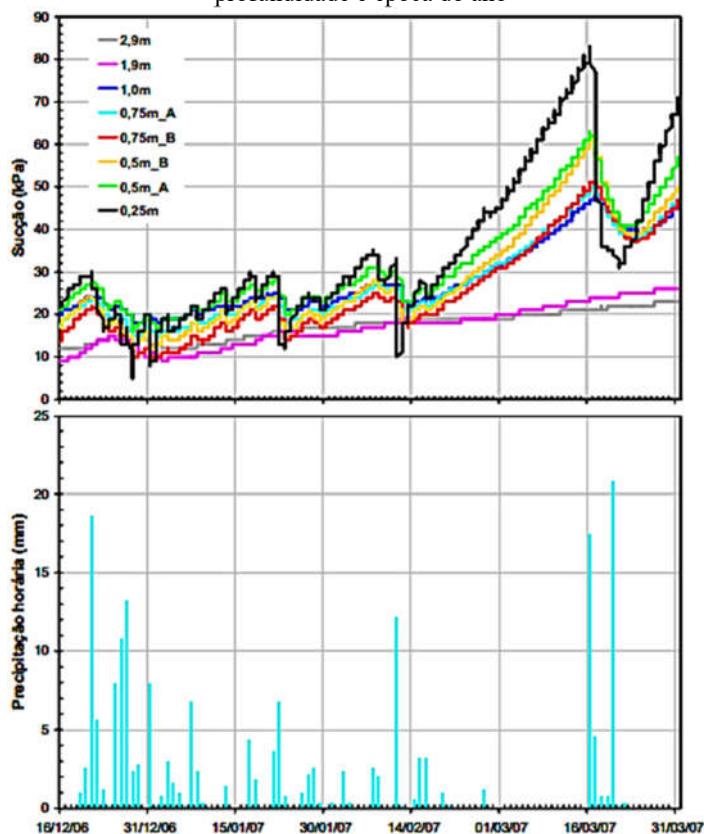
Figura 1 – Fator de segurança com relação a duração da chuva e frente de saturação



Fonte: YONG et al (1982)

Mendes (2008), obteve estudos que permitiram avaliar a relação existente entre os eventos pluviométricos com a distribuição de umidade e sucção matricial ao longo dos perfis de solos residuais de Ubatuba (São Paulo). A Figura 2 mostra a relação da precipitação com a sucção. Os resultados obtidos permitiram estabelecer algumas relações entre as propriedades mecânicas, hidráulicas e morfológicas, podendo ser usados em Planos Preventivos de Defesa Civil. Observa-se nesta Figura 2 uma redução da sucção após os eventos de chuva, seguida de um aumento de sucção nos momentos de estiagem, sendo estas variações mais facilmente percebidas na região próxima da superfície.

Figura 2 – Relação da precipitação com a sucção em uma determinada profundidade e época do ano



Fonte: MENDES (2008)

A Pesquisa de Rocha (2013), contribuiu para o entendimento do dimensionamento de estruturas de contenção em balanço, em diferentes condições de trabalho e condições ambientais (chuva e seca) percebeu que com a consideração da sucção houve uma redução dos esforços horizontais na contenção, logo redução no comprimento da ficha; por outro lado o peso específico natural variou com a sucção e esse é um fator que pode aumentar os esforços.

Assim, os tipos de problemas envolvendo solos não saturados vão além dos encontrados nos solos saturados, entre estes casos estão: (i) Empolamento devido à expansão de argilas secas e recalques devidos ao colapso com umedecimento em solos sob cargas e (ii) Variações nos valores de poro-pressão negativa associados a chuvas intensas que podem causar ruptura de taludes, redução da capacidade de carga e do módulo de resiliência do solo são alguns dos problemas encontrados em solos não saturados, deixando evidente a necessidade de conhecimento e adição destes parâmetros na estrutura (PEREIRA, 2013).

Consoante com essa problemática, são raros os estudos geotécnicos realizados em Santa Catarina que consideram em suas análises os aspectos relacionados a mecânica dos solos não saturados. Este fato impede uma compreensão mais realística dos fenômenos físicos envolvidos neste modelo de solo. Partindo deste princípio, o presente trabalho ampliará esta linha de pesquisa; com a determinação dos parâmetros geotécnicos de dois solos residuais, típicos da Ilha de Santa Catarina, e suas implicações no comportamento de obras geotécnicas.

1.2 OBJETIVOS

Com base na motivação da pesquisa e na importância encontrada para o estudo na área de solos não saturados chegou-se aos objetivos gerais e específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como principal propósito, a determinação dos parâmetros geotécnicos de dois solos residuais da Ilha de Santa Catarina com ênfase na mecânica dos solos não saturados.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Verificar o comportamento do solo não saturado;
- Definir parâmetros de resistência para dois solos;
- Analisar a influência da sucção em solos não saturados;
- Dar início a formação de um banco de dados com os parâmetros obtidos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação é dividida em seis capítulos e as referências bibliográficas, exemplificados na Figura 3 e descritos sucintamente a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a pesquisa dentro do contexto do desenvolvimento da Mecânica dos Solos Não Saturados, através de argumentos que dão ênfase as razões de pesquisa, e, desse modo, apresentando os objetivos e objetivos específicos.

O Capítulo 2 consiste de uma revisão bibliográfica acerca de assuntos abordados nesta pesquisa, apresentando conceitos teóricos da mecânica dos solos e com ênfase nos solos não saturados, além de conceitos básicos da resistência ao cisalhamento não saturada, e, por fim, equipamentos de laboratório utilizados na pesquisa.

O Capítulo 3 refere-se à descrição das áreas de estudo, geologia e pedologia do solo não saturado.

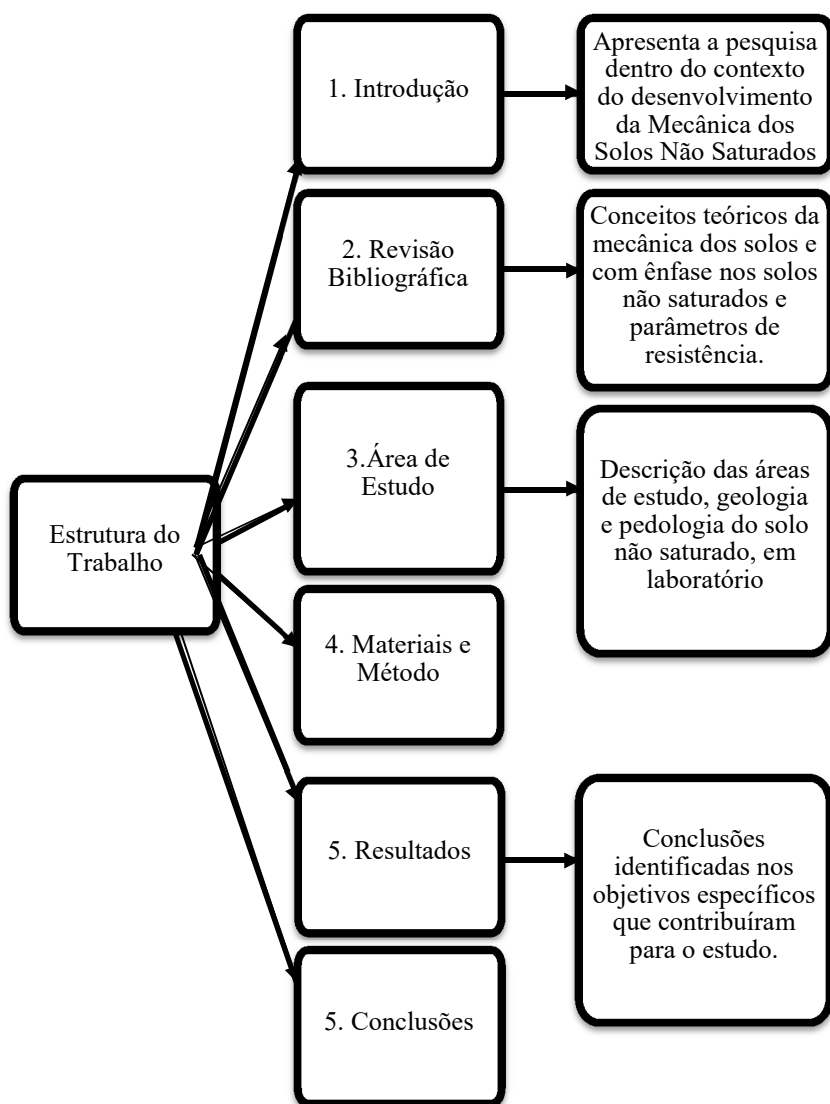
O Capítulo 4 define como serão apresentados procedimentos e técnicas em campo e em laboratório, ou seja, o método de estudo utilizado.

O Capítulo 5 mostra e analisa os resultados de laboratório e em campo, bem como a curva de retenção, ensaios de cisalhamento e a obtenção da superfície de ruptura.

O Capítulo 6 estão as conclusões identificadas nos objetivos específicos e comprovadas na análise desta pesquisa.

Finalizando a presente dissertação, tem-se as Referências Bibliográficas que contribuíram para o andamento e desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 3 – Estrutura da Dissertação

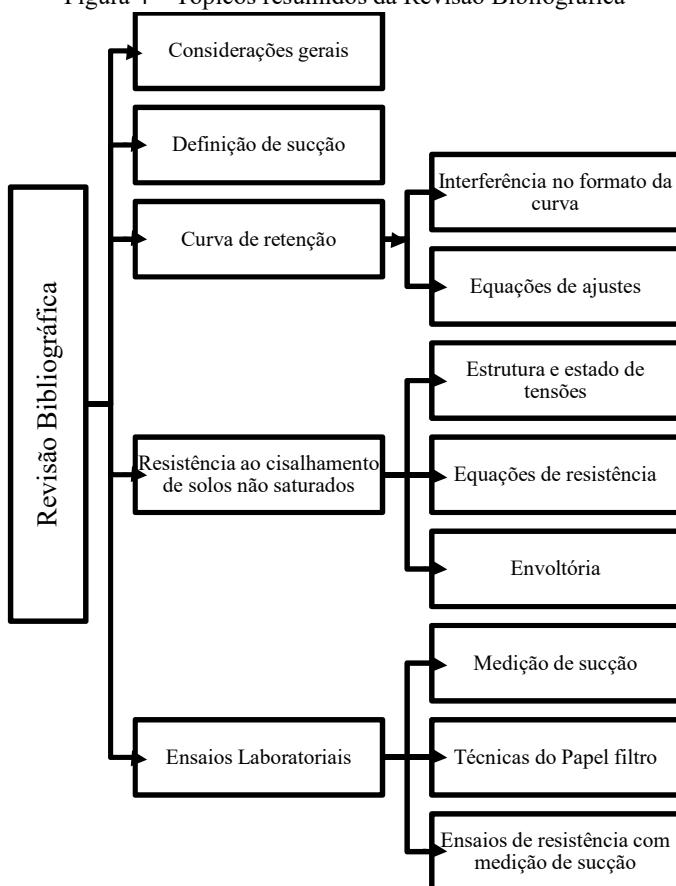


Fonte: O autor

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados temas relevantes ao estudo de solos não saturados, aos quais embasaram a pesquisa como: Introdução a solos não saturados com ênfase no estudo da sucção, análise da curva de retenção de água, investigação das equações de ajuste, resistência ao cisalhamento e técnicas para encontrar os parâmetros de resistência e análise de sucção. A Figura 4 apresenta os tópicos apresentados neste capítulo.

Figura 4 – Tópicos resumidos da Revisão Bibliográfica



Fonte: Autor

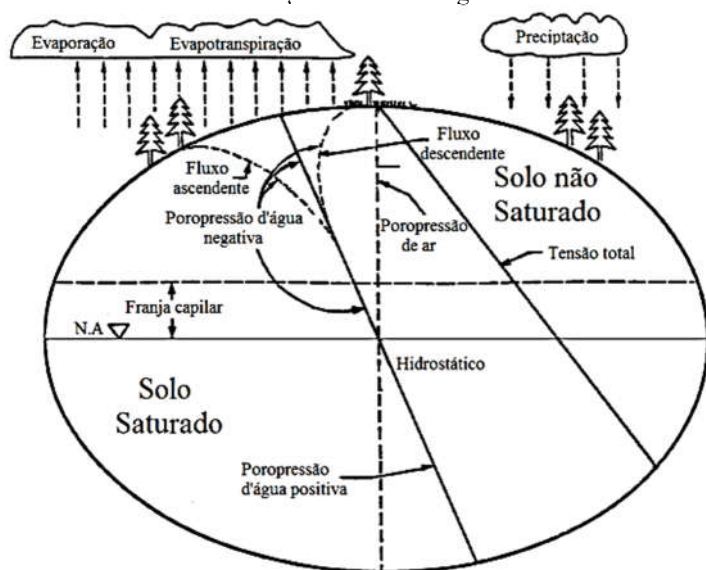
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Do ponto de vista de engenharia geotécnica, o solo pode ser visualizado como um esqueleto de partículas sólidas compreensível. Este esqueleto, na condição saturada tem seus vazios preenchidos por água, e na condição não saturada tem, em seus vazios, ar e água. A Mecânica dos solos clássica foi desenvolvida baseando-se no comportamento do solo na condição saturada; por isso a previsão do comportamento mecânico e suas propriedades hidráulicas são atualmente bem estabelecidas na teoria e na prática para o solo saturado (PEREIRA, 2013).

Porém, o solo nem sempre se apresenta na condição saturada. Em regiões de clima árido e semiárido, onde a evaporação excedem as precipitações é comprovado que existe um comportamento diferenciado ao solo saturado (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

Estudos de Wilson (1990) exemplificados por Fredlund (2006) são defendidos até hoje, e, define claramente um perfil de um solo. Desse modo, se formos analisar simplificadaamente a Figura 5, observaremos uma faixa de solo localizada abaixo do lençol freático e uma acima do lençol freático.

Figura 5 – Visualização da Mecânica dos Solos mostrando o papel da condição de fluxo de água



Fonte: Modificado de Fredlund (1996)

No solo localizado acima do lençol freático, região denominada zona vadosa, a água apresenta pressão menor que a atmosférica estando associada à mesma um valor de sucção. Esta zona vadosa, pode ser facilmente subdividida em duas porções: a porção imediatamente acima do nível de água, chamada de franja capilar, e a parte de cima da franja capilar onde o solo fica mais próximo a superfície do terreno.

A franja capilar, permanece saturada, e a parte de cima da franja capilar, onde o solo fica mais próximo À superfície do terreno, encontra-se não saturada (FREDLUND, 1996).

Uma das dúvidas seria a posição do lençol freático, mas é notório que com a variação de chuvas durante o ano esse nível tende a variar. Desse modo, o que determina a localização do lençol freático é a diferença do fluxo descendente (precipitação) e o fluxo ascendente (evapotranspiração e evaporação). No entanto, a longo prazo, se a região é árida ou semiárida o nível do lençol freático vai aumentando em relação a superfície do solo (com o tempo de escala geológica); se o clima é úmido ou temperado o nível de água tende a chegar próximo da superfície do solo (FREDLUND, 1996).

A diferença entre a poropressão do ar presente no interior da estrutura do solo e a poro pressão da água é denominada de sucção matricial. Esta sucção matricial corresponde a uma das variáveis de estado de tensão necessárias para descrever o comportamento de solo não saturado (FREDLUND, 2006).

Atualmente, se observa um avanço no desenvolvimento e um maior entendimento da teoria envolvendo solos não saturados, inclusive com algumas aplicações práticas. Como por exemplo, na avaliação de solos colapsíveis, questões ambientais envolvendo o fluxo em solos não saturados, a estabilidade de taludes etc. No entanto, mesmo a condição não saturada do solo não ser permanente durante toda as estações do ano; pelo menos durante os períodos de baixa precipitação a compreensão da mecânica dos solos pode auxiliar no desenvolvimento de projetos de curta duração (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

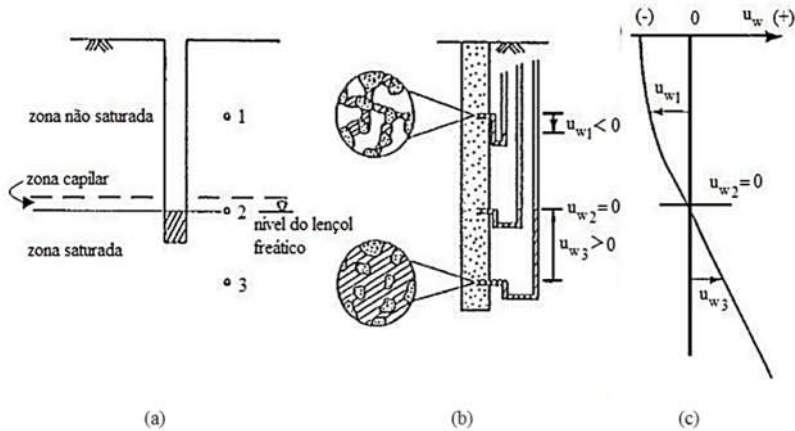
2.2 DEFINIÇÃO DE SUCÇÃO

A sucção representa a avidez ou afinidade que o solo não saturado tem por água, ou seja, é a pressão máxima que o solo, em uma dada condição, pode exercer para absorver mais água (OLIVEIRA, 2015).

Quando a água está sob pressões hidrostáticas maiores do que a pressão atmosférica, o potencial de pressão é considerado positivo, e quando ela está sob pressões menores do que a pressão atmosférica, seu

potencial é considerado negativo e esta pressão negativa é denominada sucção (Figura 6) (HILLEL, 1971).

Figura 6 – Pressão em relação ao nível d'água em um tubo



Fonte: Modificado de Hillel (1971)

Observa-se na Figura 6b que os vazios da estrutura do solo, localizado abaixo do nível do lençol freático, está totalmente preenchido por água e apresenta uma pressão positiva. Quando se considera o solo acima do nível do lençol freático e da região capilar o ar está presente na estrutura do solo e a água forma menisco que atraem uma partícula de encontro da outra. Desta forma o perfil da pressão da água apresenta um aspecto semelhante ao apresentado na Figura 6c.

Esta energia, que compõe o solo não saturado, é representada em termos de potencial equivalente ou total, formados por: potenciais gravitacional, pneumático, osmótico e matricial.

O Potencial da água no solo pode ser expresso pela equação (1):

$$\phi_t = \phi_g + \phi_p + \phi_{osm} + \phi_m \quad (1)$$

Onde: ϕ_g - potencial gravitacional [$L^2 \cdot T^2$], ϕ_p - potencial pneumático [$L^2 \cdot T^2$], ϕ_{osm} - potencial osmótico [$L^2 \cdot T^2$], e ϕ_m - potencial matricial [$L^2 \cdot T^2$].

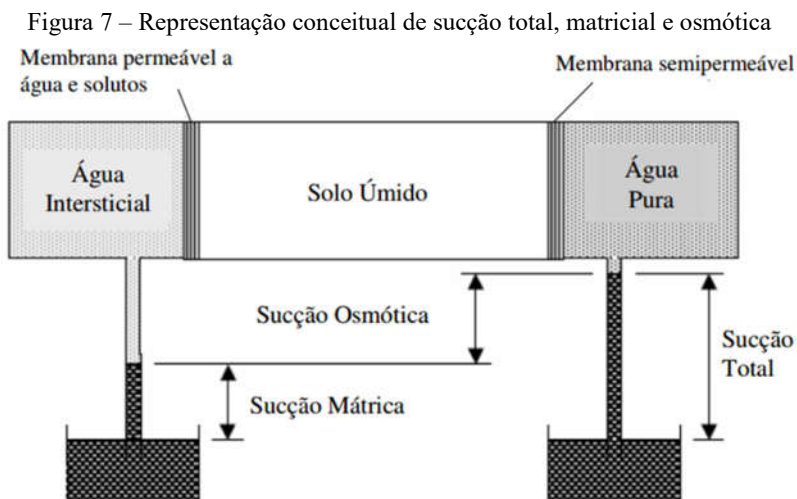
Admitindo que não há nenhum processo de adensamento e que o ar existente nos poros do solo está interligado com a atmosfera, as

parcelas correspondentes aos potenciais pneumático e gravitacional podem ser desprezadas no âmbito geotécnico (FREITAS, 2008)

Quando o potencial gravitacional e pneumático não intervêm e pode ser desprezado, o potencial total, equivale à soma da sucção matricial (S_m) e sucção osmótica (S_{osm}) resultando na sucção total (S_t) correspondente a equação (2), que são apresentados como valores negativos (SOTO, 2004).

$$S_t = S_m + S_{osm} \quad [\text{M.L}^{-1}.\text{T}^2] \quad (2)$$

A Figura 7 mostra os conceitos de sucção matricial, osmótica e a soma delas, a sucção total.



Fonte: Modificado de Marinho (2005)

Percebe-se que o contato do solo com uma membrana semipermeável permite apenas o fluxo da água pura, impedindo o fluxo de solutos, nesta situação é medida a sucção total. Já a membrana permeável, permite o fluxo tanto da água quanto dos solutos, o que torna possível a determinação da sucção matricial. A sucção osmótica é obtida pela diferença entre total e matricial.

A sucção matricial é definida quantitativamente como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água existente no solo. Esta sucção

equivale à sucção total quando a água do solo é idêntica à padrão (água pura ou solução com mesma composição da água do solo), restando apenas o efeito da matriz do solo (capilaridade e adsorção) na atração da água (Figura 8) (VILAR e CAMPOS, 2001).

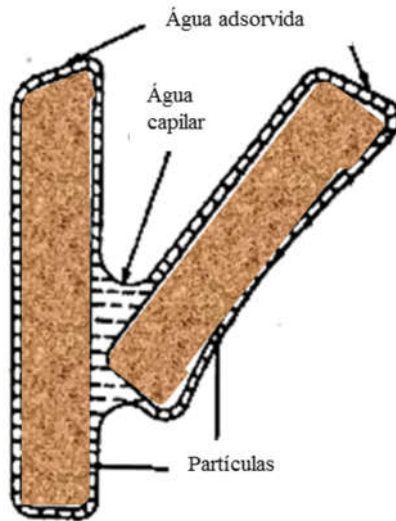
Os meniscos formados pela interface ar-água, apresentado na Figura 8, atua como uma membrana contrátil atraindo uma partícula de encontro a outra aumentando assim as tensões efetivas.

Desse modo, a sucção mátrica é composta por duas parcelas, como mostrado na (3):

$$S_m = S_c + S_{ads} \quad [M.L^{-1}.T^2] \quad (3)$$

Onde: (S_c) é a sucção capilar devido aos efeitos de capilaridade, (S_{ads}) é a sucção devido aos efeitos de adsorção.

Figura 8 – A sucção matricial em solo não saturado com seus efeitos



Fonte: Modificado de Hillel (1971)

A parcela de sucção capilar está relacionada com o nível macroestrutural do solo, ou seja, com poros interligados nos quais a água flui devido a gradientes de pressão capilar. A parcela de adsorção está

associada ao nível microestrutural, ou seja, de hidratação dos minerais argílicos (OLIVEIRA, 2004).

A sucção osmótica é a diferença de pressão através de uma membrana que permite apenas o fluxo de água entre solução do solo e a água pura (GEORGETTI, 2010).

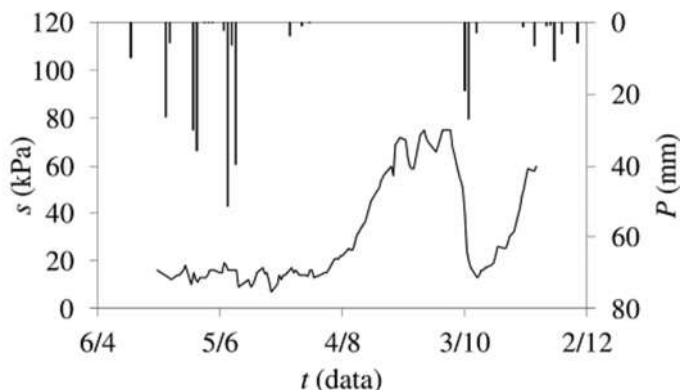
O componente osmótico na sucção relaciona-se à concentração química da água, sendo que a importância da sucção osmótica na geotecnia, segundo Fredlund e Rahardjo (2012), ocorre em solos expansivos, onde a concentração de sais tem considerável influência, entretanto é comum considerar a sucção total igual a matricial.

A sucção osmótica parece não ser sensível às variações do conteúdo de água no solo. Como resultado, em Mecânica dos Solos não saturados, tem-se atribuído uma mudança na sucção total a variações na sucção matricial, considerando desprezível a contribuição da sucção osmótica (FREDLUND e RAHARDJO, 2012).

Fredlund e Rahardjo (2012) relatam que, ainda que seja possível avaliar a sucção osmótica atuante em um solo, uma grande parcela dos problemas de engenharia envolvendo solos não saturados vêm de mudanças ambientais, e estas afetam principalmente a componente de sucção matricial do solo, sendo assim, uma mudança na sucção total é equivalente a uma mudança na sucção matricial.

Em termos reais, esta sucção sofre variação durante todo o ano, e estas mudanças tem forte ligação com as precipitações que ocorrem em uma região (Figura 9). Deste modo, o solo sofre variação paulatina da umidade devido às estações de seca e de chuva com ciclos de umedecimento e secagem (CASTRO, SOARES, *et al.*, 2015).

Figura 9 – Variação da sucção no campo a 1m de profundidade com medidas de precipitação

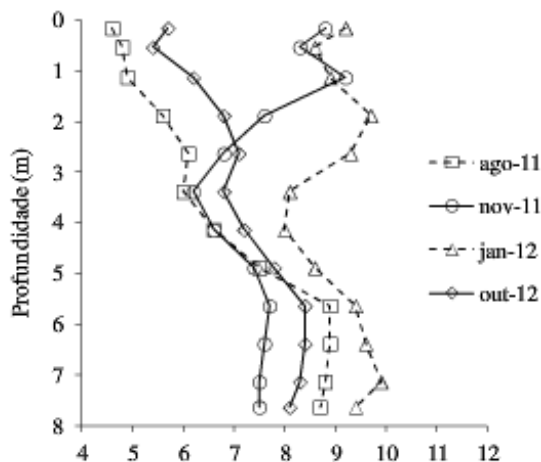


Fonte: (CASTRO, SOARES, et al., 2015)

Assim, é possível observar que com a variação de umidade do solo existe uma variação da sucção no perfil do solo. É notório em estudos de Blight (2013), Cui et al. (2008), Caruso e Jommi (2010) e Castro et al. (2015), onde a umidade varia ao longo da profundidade e tempo e consequentemente influenciando a sucção.

Pode-se perceber na Figura 10, um perfil onde foi coletado amostras de umidade em determinado mês do ano (em estações diferentes) e em várias profundidades. Como pode ser visto, a maior variação da umidade ocorre próximo a superfície do terreno, onde o solo interage com a atmosfera, e diminui com o aumento de profundidade. O resultado desse estudo mostra que até quatro metros de profundidade são influenciados pelas mudanças climáticas.

Figura 10 – Perfil de umidade do solo



Fonte: (CASTRO, SOARES, et al., 2015)

A variação da sucção no solo é decorrente de um processo complexo que depende das condições meteorológicas e atmosféricas e das características de permeabilidade e de armazenamento ou retenção do solo, principalmente na superfície, onde o solo interage com o meio ambiente (CASTRO, SOARES, *et al.*, 2015).

Assim, a sucção tem sido apontada como uma importante variável no estudo dos solos não saturados, é de grande importância que dados contínuos de monitoramento de umidade e de sucção sejam levantados em diferentes regiões cobertas por solos não saturados e que tais dados sejam delimitados dentro de certos intervalos de variação (CASTRO, SOARES, *et al.*, 2015).

2.3 CURVA DE RETENÇÃO

Os solos não saturados estão ligados diretamente com os efeitos de sucção no seu perfil estratigráfico. Com a necessidade de estudar a influência da sucção, chegou-se ao entendimento que cada tipo de solo tem uma maneira de reter água na sua estrutura e uma das formas para entender esse comportamento é através da curva de retenção.

A forma como o solo administra a presença de água no seu interior pode ser representada pela curva de retenção de água. Esta curva consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a

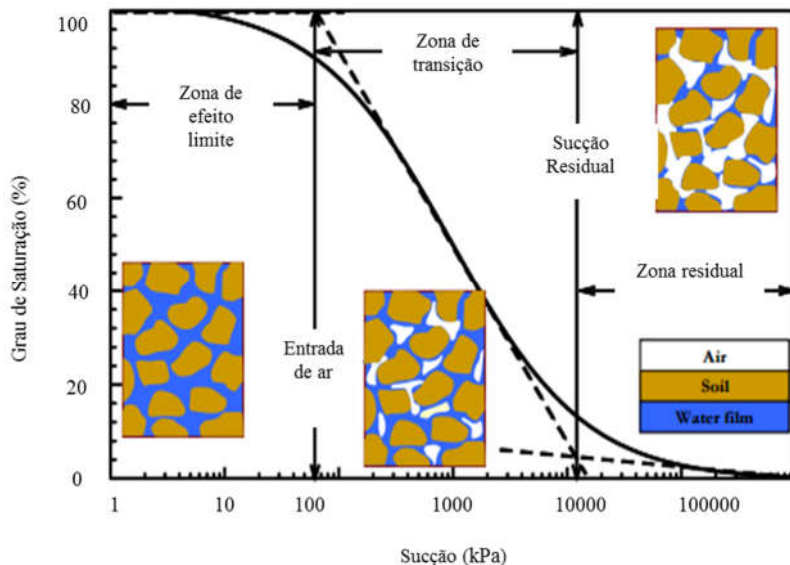
energia necessária para remover esta água (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

A curva de retenção de água dos solos representa a relação entre a quantidade de água presente em sua estrutura, dada pelo grau de saturação, umidade volumétrica ou umidade gravimétrica, e a sucção. O seu formato reflete, entre outros aspectos, a distribuição de poros da estrutura do solo, o tipo de solo, a história de tensões a que esteve submetido e a umidade de compactação. Estes fatores estão diretamente relacionados com as suas propriedades geotécnicas de resistência e deformabilidade (OLIVEIRA e MARINHO, 2015).

Fredlund (2006) e Fredlund et al. (2012) já se referem à curva de retenção como a propriedade chave para a implementação da mecânica dos solos não saturados na prática da engenharia e, é de fato, uma das ferramentas mais importantes do solo não saturado. Esta argumentação é perceptível quando associamos a curva de retenção com a estrutura de solo.

Assim, ao analisar em nível de estrutura, a curva de retenção pode ser dividida em três estágios, conforme Figura 11. O primeiro estágio, denominado de zona de efeito limite, que predomina até o valor de entrada de ar, corresponde a uma condição onde praticamente todos os poros estão preenchidos de água. O segundo estágio ocorre na curva de drenagem ou de adsorção, que pode ser chamada de fase de transição e a terceira fase, denominada por fase residual de drenagem. Nesta fase a continuidade de água é reduzida a descontínua, além dos acréscimos de sucção leva o solo a mínimas variações no grau de saturação (VANAPALLI, FREDLUND e PUFAIL, 1999).

Figura 11 – Curva de Retenção e a estrutura do solo



Fonte: (VANAPALLI, FREDLUND e PUFALL, 1999)

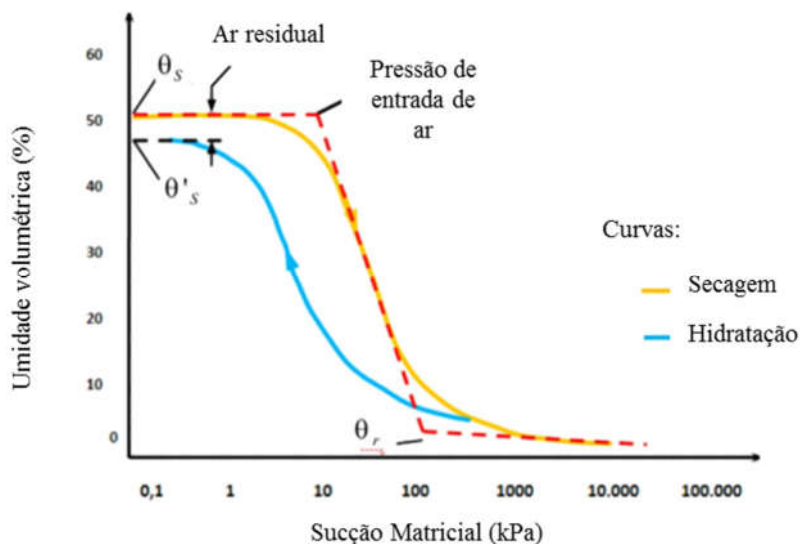
Esta curva pode ser obtida com a utilização de vários tipos de equipamento tendo sido proposto, por diferentes pesquisadores, algumas equações de ajuste. Os pontos experimentais da curva de retenção podem ser obtidos através de trajetórias típicas, obtidas através de procedimentos de secagem e umedecimento.

O processo de secagem se dá quando uma amostra de solo previamente saturada é submetida a crescentes sucções matriciais, com expulsão da água pelo material. O segundo método tem na amostra seca um reservatório para entrada do diluído, submetido à redução gradual da sucção. Em ambos os procedimentos devem ser medidas as umidades de equilíbrio para cada estágio de sucção (MENEZES, 2013).

O Processo de obtenção dos pontos experimentais da formação da curva de retenção de um solo consiste em se determinar, para cada nível de sucção que apresente ao longo de sua trajetória de umedecimento ou secagem, o correspondente valor dos índices físicos, os quais são

explicados na seção 2.5. Porém, qualquer que seja o processo de obtenção da curva, seja secagem ou umedecimento é possível analisar pontos estratégicos, na Figura 12, destacam-se: a umidade de saturação na secagem (θ_s) e no processo de umedecimento (θ'_s), a pressão de entrada de ar e a umidade de ar residual (θ_r).

Figura 12 –A Curva de Retenção



Fonte: (VANAPALLI, FREDLUND e PUFAIL, 1999)

A pressão de entrada de ar, quando atingida, significa o início do esvaziamento do maior poro; para valores inferiores a ela, o solo se mantém saturado, mesmo com pressões negativas. A umidade residual representa um valor abaixo do qual, praticamente não se consegue extrair água do solo com o aumento de sucção (VILAR et al., 2001 apud MENEZES, 2013).

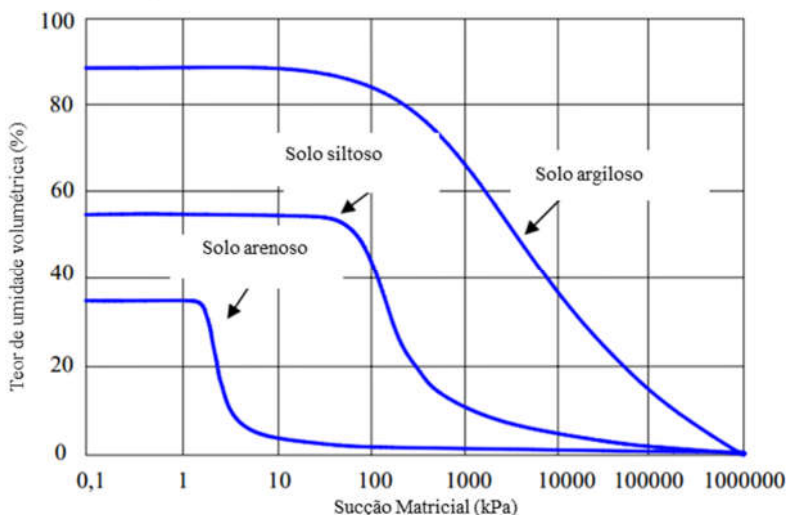
2.3.1 Interferência no formato da curva

Dependendo do tipo de solo, a curva tem um formato e uma característica. Os principais fatores que interferem na forma da curva são: Distribuição granulométrica, distribuição dos poros e a estrutura das partículas (ROHM, 1993).

Além da influência do tipo de solo, estudos de Oliveira (2004), mostraram que a umidade de moldagem e a história de tensão, também modificam o formato da curva. Corpos de prova de um mesmo tipo de solo moldado com diferentes teores de umidade apresentam curvas de retenção distintas. Amostras compactadas podem ser submetidas a diferentes histórias de tensões e as variações de carregamento externo e da sucção, podem produzir alterações na estrutura do solo.

Porém, de uma maneira geral, Solos granulares tendem a apresentar perda brusca de umidade, quando a sucção ultrapassa a sucção de entrada de ar, associada aos macroporos. Em contra partida, solos finos tendem a exibir curvas mais suaves conforme Figura 10 (VANAPALLI, FREDLUND e PUFAIL, 1999).

Figura 13 – Curva de Retenção e a estrutura do solo



Fonte: (VANAPALLI, FREDLUND e PUFAIL, 1999)

Quanto maior a plasticidade das argilas, maiores serão os valores de entrada de ar e de sucção residual. Por conter poros com diferentes diâmetros, os solos argilosos dessaturam lentamente. Os solos siltosos apresentam comportamento intermediário entre os argilosos e arenosos (FREDLUND, 2006).

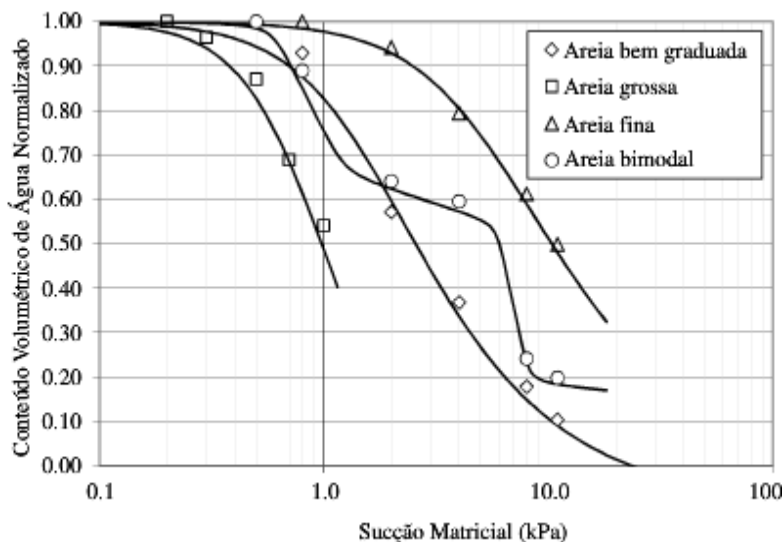
De uma maneira geral, a habilidade de reter água pelo solo está diretamente relacionada com a matriz de distribuição espacial dos poros,

ou seja, os solos mais finos retêm uma maior porcentagem de água do que solos mais grossos, isso deve-se ao fato de que estes solos possuem uma superfície de adsorção maior e maiores espaços porosos (SANTOS, *et al.*, 2015).

A curva característica depende basicamente do arranjo poroso do solo, ou seja, de sua estrutura, quando o conteúdo de água no solo se encontra próximo a saturação. Em outras palavras, a distribuição granulométrica, daquele solo tem influência direta na determinação da curva característica do mesmo quando próximo a saturação (SANTOS *et al.*, 2015).

Para tanto, a Figura 14 mostra curvas características de areia de mesma origem, porém com granulometrias artificialmente alteradas por peneiramento, sendo elas: areias bem graduadas, areia fina, areia grossa e areia descontínua. Percebe-se que o reflexo das variações granulométricas nas curvas características corresponde qualitativamente ao que é esperado. Areias grossa e fina apresentam extremos em termos de capacidade de retenção e areias bem graduadas e mal graduadas se encontra entre o mesmo extremo.

Figura 14 – Curvas Característica de diversas areias



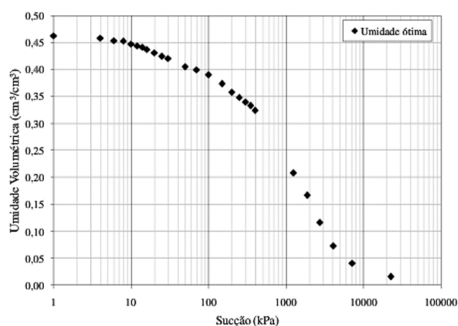
Fonte: (SANTOS *et al.*, 2015)

Desse modo, chegou à conclusão que o tipo de mineral formado, e a distribuição granulométrica do solo, é um fator fundamental na capacidade do solo de absorver água como elemento poroso. Associado ao aspecto granulométrico e mineralógico, tem-se o fator relacionado com as tensões. O índice de vazios reflete, de certa forma, a história de tensões do solo e este, portanto, afeta sua característica de retenção de água (MARINHO, 2005).

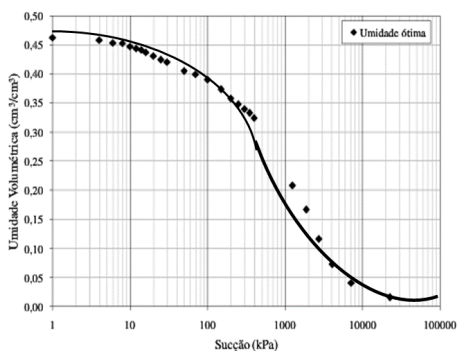
2.3.2 Equações de ajuste para curva de retenção

Os dados obtidos nos ensaios laboratoriais para obtenção da curva de retenção de água do solo são pontuais tendo sido propostas diferentes equações de ajuste para a sua representação contínua. A Figura 15, representa um estudo de Oliveira (2004), com pontos de ensaios e um possível traçado de uma função.

Figura 15 – Curvas de retenção de solo compactado a umidade ótima



(a) Dados obtidos de ensaios



(b) Possível traçado da curva

Fonte: Modificado de Oliveira (2004)

Tabela 1 – Equações de ajuste para a curva de retenção

Autores	Equação	Parâmetros
Gardner (1956)	$\theta_n = 1/(1 + a_g \cdot \psi^{n_g})$	a_g, n_g
Brooks e Corey (1964)	$\theta_n = 1$	$\psi \leq \psi_b$
	$\theta_n = (\psi/\psi_b)^{-\lambda_{bc}}$	$\psi > \psi_b$
Brutsaert (1966)	$\theta_n = 1/(1 + (\psi/a_b)^{n_b})$	a_b, n_b
Van Genuchten (1980)	$\theta_n = 1/[1 + (a_{vg} \cdot \psi^{n_{vg}})]^{m_{vg}}$	a_{vg}, m_{vg}, n_{vg}
McKee e Bumb (1984)	$\theta_n = 1$	$\psi \leq \psi_{m1}$
	$\theta_n = \exp((a_{m1} - \psi)/n_{m1})$	$\psi > \psi_{m1}$
McKee e Bumb (1987)	$\theta_n = 1/(1 + \exp((a_{m2} - \psi)/n_{m2}))$	a_{m2}, n_{m2}
Fredlund e Xing (1994)	$\theta_n = \frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a_{fx}} \right)^{n_{fx}} \right] \right]^{m_{fx}}}$ $C(\psi) = 1 - \ln(1 + \psi/\psi_r)/\ln(1 + 10^6/\psi_r)$	$a_{fx}, m_{fx}, n_{fx}, \psi_{fx}$
Gitirana e Fredlund (2004)	$\theta_n = \frac{S_1 - S_2}{[1 + (\psi/\sqrt{\psi_b \psi_{res}})^d]^a} + S_2$	$d, \psi_b, S_{res}, \psi_{res}$

Fonte: Carvalho, Gitirana Jr et al. (2015)

A partir da necessidade de representar essas curvas de retenção, surgiram modelos de equações de ajustes pré-definidas a dados obtidos experimentalmente. A Tabela 1 apresenta algumas equações propostas na literatura para representar a curva característica.

Como é percebido, a variável de umidade normalizada (θ_n), consta na maioria das equações, isso ocorre devido aos modelos terem como pretensão o ajuste da curva de retenção até o valor de umidade residual (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

Desse modo, a maioria dos modelos apresentados na Tabela 1 emprega a seguinte relação (4):

$$\Theta_n = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad [M.V^{-3}] \quad (4)$$

Onde: θ_{sat} é o teor de umidade do material saturado; θ_{res} é o teor de umidade volumétrico residual.

Os parâmetros ($a_i, n_i, \psi_i, \lambda_i, m_i$), determinam a forma e curva da função e são obtidos de forma empírica no gráfico ou matematicamente. De forma geral, quanto maior o número de parâmetros, maior a capacidade de ajuste da equação, sob o custo do aumento da complexidade da função (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

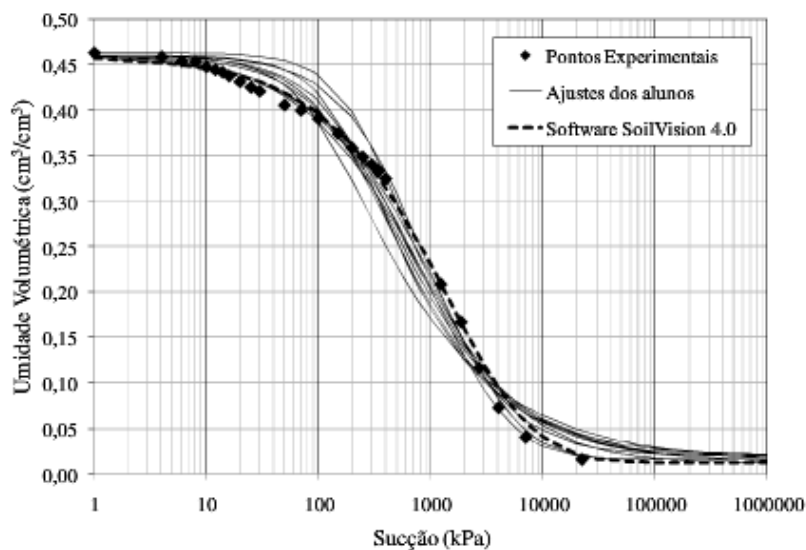
Estes parâmetros, são de extrema importância, pois qualquer mudança compromete no formato da curva e assim nos valores de sucção de entrada de ar e residual (ψ_r) por exemplo, que são aspectos essenciais para a análise de um perfil de solo. A título de exemplo, tem os estudos realizados por Oliveira e Marinho (2015), que mostra 10 ajustes manuais das equações propostas por Fredlund e Xing (1994) e Van Genuchten (1980), onde os parâmetros de ajuste foram inicialmente estimados, e, posteriormente ajustados manualmente, de forma com que as curvas correspondentes a cada uma das equações, ficassem o mais próxima possível dos pontos experimentais.

Como é possível observar na Figura 16, visualmente, a equação proposta por Fredlund e Xing (1994) ficaram mais próximas dos pontos experimentais se comparadas com a função de Van Genuchten (1980), e, essas duas funções comparadas com o ajuste do software *Soil Vision 4.0*, perdem na aproximação aos pontos experimentais.

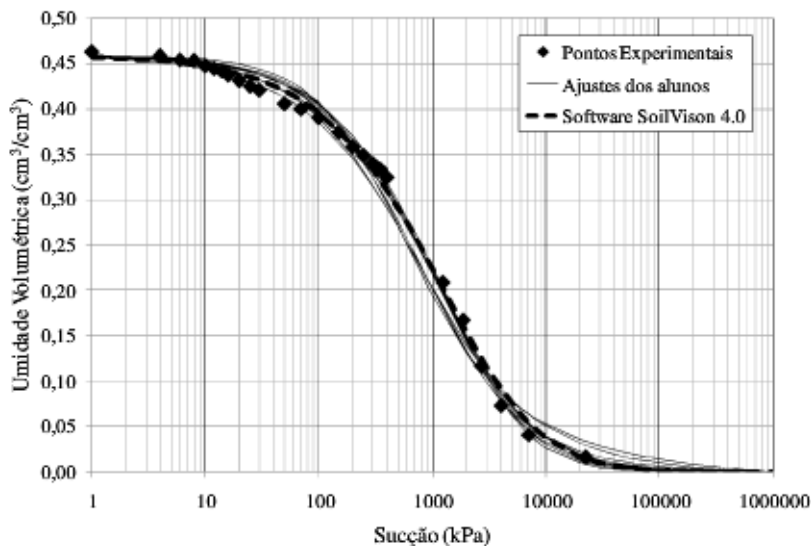
Desse modo, fica evidente que um melhor ajuste aos pontos experimentais pode ser obtido ao se utilizar programas computacionais, aplicando o método dos mínimos quadrados (FREDLUND e XING, 1994).

A curva de retenção é uma das propriedades mais fundamentais e, ao mesmo tempo mais complexas de solos não saturados. A quantidade de fatores que controlam a curva de retenção torna desafiadora a interpretação e emprego da propriedade. Felizmente, tais fatores, quando bem conhecidos, tornam aquela informação, inicialmente complexa, em uma propriedade que oferece um grande volume de informações a respeito do comportamento do solo (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

Figura 16 – Curvas de retenção de solo compactado na umidade ótima



(b) Curva de retenção proposta de Van Genuchten (1980)



(b) Curva de retenção proposta de Fredlund e Xing (1994)

Fonte: Modificado de Oliveira (2015)

Atualmente, fica claro que ter o conhecimento da curva de retenção de um solo é essencial para entender o comportamento, tanto que existem estudos onde é empregada como função de permeabilidade e até mesmo a resistência ao cisalhamento, ao qual será mostrada ainda nesta revisão. Os campos de aplicação da curva de retenção continuarão a crescer à medida que ocorram os avanços na modelagem do comportamento de solos (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

2.4 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NÃO SATURADOS

A grande maioria dos problemas, aos quais os engenheiros geotécnicos estão submetidos no dia a dia da prática de engenharia, estão relacionados à resistência ao cisalhamento dos solos; sendo os mais comuns envolvendo a capacidade de carga dos solos, empuxos de terra laterais, estabilidade de taludes, entre outros (PEREIRA, 2013).

Para solos não saturados, existe o parâmetro sucção, que estão fortemente ligados com as tensões efetivas no solo e consequentemente à resistência ao cisalhamento.

2.4.1 Estrutura e o estado de tensões em solo não saturado

Com a descoberta do comportamento diferenciado dos solos não saturados, fica evidente que a aplicação voltada ao comportamento mecânico deste tipo de solo também se diferencia dos solos saturados, isto é percebido ao se analisar um perfil de solo e verificar a sua estrutura.

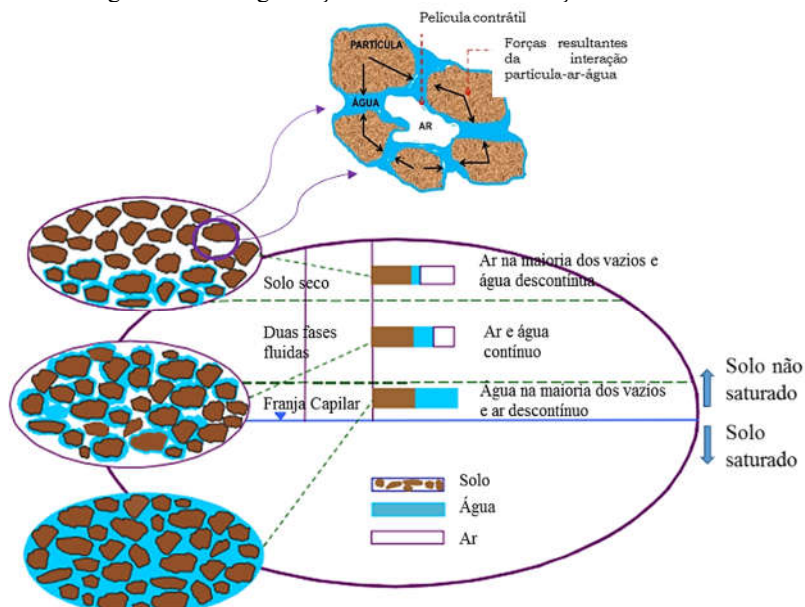
O solo saturado é constituído de água e solo incompressível em sua estrutura, porém ao analisar o perfil de solo acima do nível do lençol freático verifica a presença de ar que com a aproximação a superfície do solo essa presença de ar fica mais evidente, e assim ar contínuo (Figura 17). Deste modo, este solo caracteriza pela ocorrência de água e ar em seus vazios, onde a quantidade varia de acordo com os teores de umidade inicial (MENEZES, 2013).

No entanto, ao ampliarmos o elemento de solo não saturado verificaremos um sistema quadrifásico, constituído por: uma fase sólida (grãos e partículas minerais), líquida (composta geralmente por água), uma fase gasosa (composta por ar), e a fase que é referente à interface ar-água, chamada de película contrátil (FREDLUND e MORGENSTERN, 1977).

Quando a fase de ar é contínua, a película contrátil interage com as partículas de solo influenciando o comportamento mecânico do material e a propriedade mais importante dessa quarta fase é sua habilidade de

exercer uma tensão de tração, essa propriedade é conhecida como tensão superficial (FREDLUND e RAHARDJO, 2012).

Figura 17 – Categorização do solo com a variação de umidade



Fonte: Modificado de Fredlund (2006)

Essas fases que compõem o solo não saturado, são capazes de modificar a capacidade de resistência a tensões cisalhantes geradas nos contatos por cargas externas aplicadas. Isso é percebido na estrutura dos solos (FREDLUND, 2006).

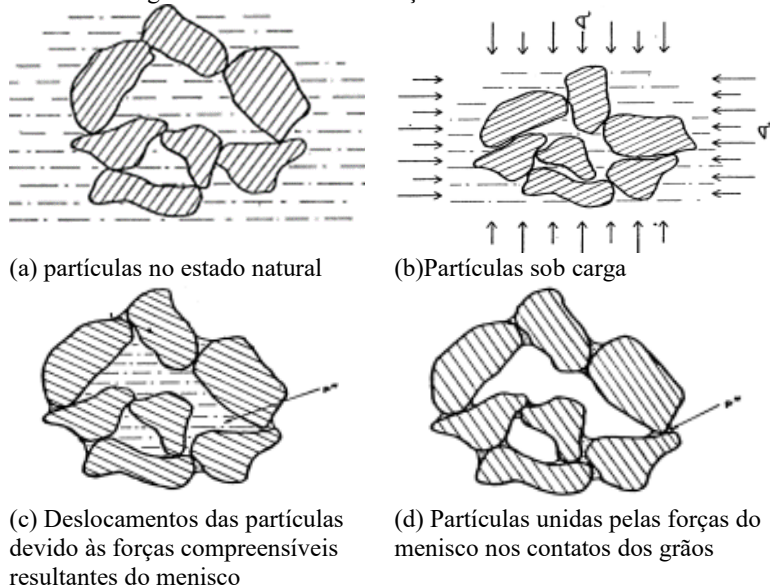
Em solos tipicamente granulares, os grãos tendem a formar pontes e arcos entre si, e com a aplicação de cargas externas, seus contatos acabam por desenvolver forças cisalhantes e normais, fazendo com que ocorra deslizamento entre grãos. O menisco gerado pela interface ar-água faz com que ocorra uma união dos grãos. Como consequência há uma maior capacidade de resistência a tensões cisalhantes geradas nos contatos. Com o umedecimento do solo, esta união entre grãos é removida, ocorrendo colapso do solo (PEREIRA, 2013).

Para solos argilosos, o comportamento geral vai depender da situação de carga aplicada e da variação da umidade do solo, podendo expandir ou colapsar. Logo, no caso de umedecimento de um solo

argiloso sob carga, poderá ocorrer uma tendência de quebra do pacote de partículas ou expansão deste (PEREIRA, 2013).

A Figura 18 apresenta as alterações da estrutura do solo sobre o efeito de carga e com a influência da sucção.

Figura 18 – Curva de Retenção e a estrutura do solo



Fonte: Modificado de Jennings e Burland (1962)

O importante destes argumentos é que com a modificação da estrutura e com o surgimento da sucção neste elemento de solo, novas formas de tensões são adicionadas, e consequentemente há a necessidade de uma análise diferenciada, fazendo com que estudos propostos para solos saturados sejam inválidos neste tipo de caso.

Podemos perceber que em solos saturados, a resistência ao cisalhamento é expressa em função da tensão efetiva, σ' , definida por Terzaghi (1936) como:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad [\text{P.A}^{-2}] \quad (5)$$

Onde: σ é a tensão normal total ; u_w é a pressão na água dos vazios do solo.

Como a equação de Terzaghi funcionava muito bem só para solos saturados, diversas equações foram propostas para definir as tensões efetivas em solos não saturados, uma das primeiras foi a definida por Bishop (1959), dada por:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_a - u_w) \quad [\text{P.A}^{-2}] \quad (6)$$

Onde: σ é a tensão normal total; u_w é a pressão na água dos vazios do solo, u_a é a pressão no ar dos vazios do solo e χ é o parâmetro dependente do tipo do solo e seu grau de saturação, variando de 0 a 1.

No entanto, seguindo uma filosofia diferente, em que não havia a preocupação de definir uma equação geral de tensões efetivas, Fredlund (1973) demonstrou que com a presença de ar nos vazios do solo, há uma modificação no comportamento mecânico dos solos não saturados, com o surgimento de três variáveis de tensão: tensão líquida normal ($\sigma - u_a$), sucção matricial ($u_a - u_w$), e a já conhecida tensão efetiva ($\sigma - u_w$), estas variáveis são independentes, tendo em vista, por exemplo (7):

$$(\sigma - u_w) = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w) \quad [\text{P.A}^{-2}] \quad (7)$$

Com esta análise teórica do estado de tensões, baseados na mecânica das multifases do solo concluíram que duas das três possibilidades das variáveis de tensão normal poderiam ser usadas para descrever o estado de tensões dos solos não saturados. As combinações estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Possíveis combinações de variáveis de estado de tensão para solos não saturados

Pressão de Referência	Variáveis de estado de tensão
Ar, u_a	$(\sigma - u_a), (u_a - u_w)$
Água, u_w	$(\sigma - u_w), (u_a - u_w)$
Total, σ	$(\sigma - u_a), (\sigma - u_w)$

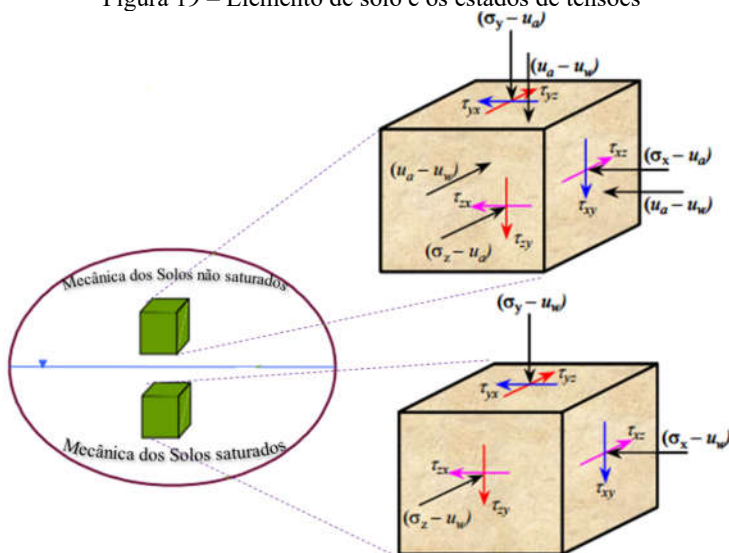
Fonte: Fredlund e Rahardjo (1993)

Como é perceptível, possíveis combinações de variáveis podem ser usadas para o estado de tensão. Entretanto, a combinação utilizando as variáveis ($u_a - u_w$) e $(\sigma - u_a)$, parece ser a mais satisfatória para o uso

da prática geotécnica, pois essa combinação é vantajosa, pelo motivo dos efeitos na mudança de pressão total sobre o solo poderem ser separados dos efeitos causados na mudança de pressão da água nos poros (FREDLUND, 1996).

Desse modo, há uma análise diferenciada na resistência ao cisalhamento se comparados com os solos não saturados. A Figura 19 representa uma proposta de um elemento de solo com os estados de tensões atuantes relacionados com a mecânica dos solos saturados e não saturados.

Figura 19 – Elemento de solo e os estados de tensões



Fonte: (VANAPALLI, FREDLUND e PUFALL, 1999)

2.4.2 Equações de resistência ao cisalhamento não saturado

Com o surgimento dos novos conceitos perante os solos, houve a necessidade de novas equações a serem aplicadas aos solos não saturados. Bishop et al. (1960), baseado no conceito de tensões efetivas, apresentou a primeira equação (8) na determinação da resistência ao cisalhamento de solos não saturados:

$$\tau_r = c' + [(\sigma - u_a)_r + \chi \cdot (u_a - u_w)_r \cdot \tan \phi'] \quad [\text{P.A}^{-2}] \quad (8)$$

Onde: c' e ϕ' = parâmetros efetivos de resistência do solo saturado; τ_r = resistência ao cisalhamento não saturado na ruptura; $(\sigma - u_a)_r$ = tensão normal líquida atuante no plano de ruptura; $(u_a - u_w)_r$ = sucção matricial de ruptura; e χ = parâmetro dependente do grau de saturação.

De acordo com a Equação 8 a resistência ao cisalhamento é dada por uma única variável de estado de tensão, termo entre colchetes, sendo a mesma representada em um gráfico bidimensional. No entanto, o parâmetro χ varia de acordo com a condição de saturação (0 para seco e 1 para saturado). Várias investigações mostram limitações na tentativa da quantificação do parâmetro χ , tanto experimentalmente como teoricamente.

A equação de Bishop, que pode ser considerada como a mais geral dentre as demais proposições, apresenta o inconveniente de incorporar um parâmetro, χ , que não representa uma característica fundamental do solo, sendo função de sua história prévia de umedecimento e secagem, além do grau de saturação e tipo de material (Jennings e Burland, 1962; Bishop e Blight, 1963; Fredlund e Morgenstern, 1977).

Devido essa dificuldade de obtenção do parâmetro χ , Fredlund et al. (1978), baseado no conceito de variáveis de tensão, propuseram a seguinte equação (9) de resistência ao cisalhamento para solos não saturados:

$$\tau_r = c' + (\sigma - u_a)_r \cdot \text{tg } \phi' + \text{tg } \phi^b (u_a - u_w)_r \quad [\text{P.A}^{-2}] \quad (9)$$

Onde: c' e ϕ' = parâmetros efetivos de resistência do solo saturado; τ_r = resistência ao cisalhamento não saturado na ruptura; $(\sigma - u_a)_r$ = tensão normal líquida atuante no plano de ruptura; $(u_a - u_w)_r$ = sucção matricial de ruptura; e ϕ^b = parâmetro que quantifica um aumento na resistência devido a sucção para solos não saturados

Comparando as equações (8) e (9), percebe-se que as propostas de Bishop et al. (1960) e Fredlund et al. (1978), apesar de serem conceitualmente diferentes, fornecem equações de resistência equivalentes, como mostra na equação (10):

$$\chi \cdot \operatorname{tg} \phi' = \operatorname{tg} \phi^b \quad (10)$$

No entanto a proposta de Fredlund et al. (1978) é mais difundida na avaliação da resistência ao cisalhamento para solos não saturados, pois na prática, o parâmetro ϕ^b é experimentalmente mais fácil de ser determinado do que o parâmetro χ (CAMPOS, 1997).

2.4.3 Envolvória de resistência não saturada

Da mesma forma que existe uma representação gráfica para equações de solos saturados, com as novas representações de equações, é possível obter gráficos que demonstrem a condição não saturada de um solo.

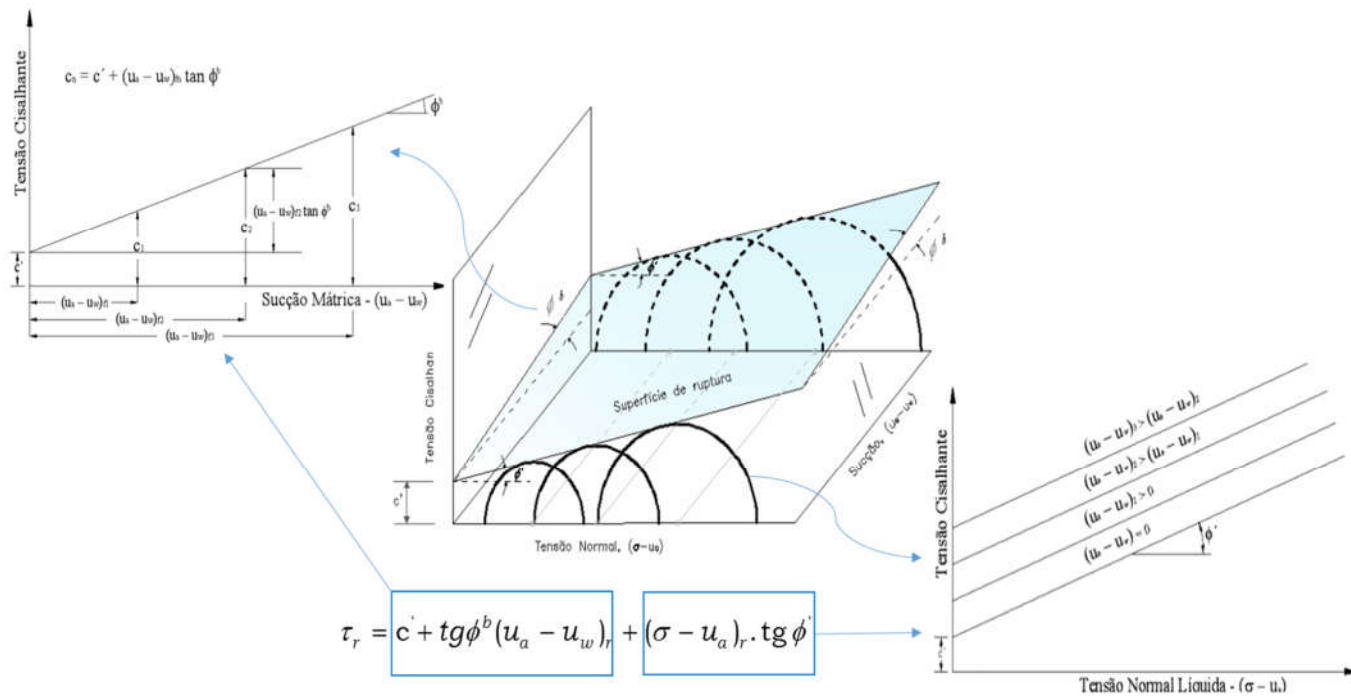
Diferentemente da proposta de Mohr Coulomb, onde a envoltória de resistência saturada é representada por um gráfico bidimensional envolvendo a variável de estado de tensão $(\sigma_n - \sigma_w)$ e a tensão cisalhante (τ_r) ; para a representação do solo não saturado requer-se o uso de um espaço tridimensional para definir a envoltória de ruptura com as variáveis de tensão que atua na estrutura não saturada.

Desse modo, Fredlund e Rahardjo (1993) surgiu com a proposta de descrever a envoltória de ruptura estendida de Mohr-Coulomb para solos não saturados, que devido a sua simplicidade é bastante conhecida e se tornou base para os estudos desta área.

A envoltória linear, parte da proposta da equação 9, onde o diagrama de Mohr estendido, utiliza um terceiro eixo ortogonal para representar a sucção mátrica $(u_a - u_w)_r$. O círculo de Mohr é desenhado em um plano com a tensão normal líquida $(\sigma - u_a)$, como abscissa; e a tensão cisalhante (τ) , como ordenada. A sucção mátrica irá determinar a posição no diagrama de Mohr ao longo do terceiro eixo. Como o solo começa a saturar, a sucção mátrica torna-se nula e o diagrama de Mohr transforma-se em um plano simples $(\tau \text{ versus } (\sigma - u_a))$ (PEREIRA, 2013).

A Figura 20, mostra a envoltória de resistência planar, que consiste em um plano com inclinações ϕ^b nos eixos $\tau \text{ versus } (u_a - u_w)$ e ϕ' nos eixos $\tau \text{ versus } (\sigma - u_a)$. Qualquer linha neste plano traçada paralela aos eixos $\tau \text{ versus } (\sigma - u_a)$, intercepta o plano definido pela origem dos eixos $\tau \text{ versus } (u_a - u_w)$ em uma ordenada $c = c' + \operatorname{tg} \phi^b (u_a - u_w)$. A parcela definida para o plano $\tau \text{ versus } (u_a - u_w)$ é $\tau = c' + \operatorname{tg} \phi' (\sigma - u_a)$.

Figura 20 – Envolvória de Resistência de Solos não saturados e suas projeções

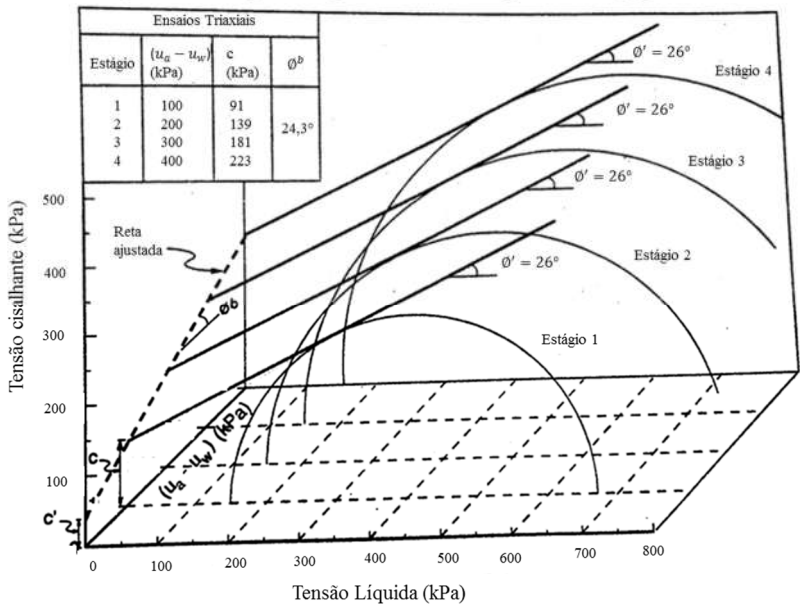


Fonte: Fredlund et al. (1978)

Além disso, é possível notar através das projeções dos gráficos da Figura 20, que esta envoltória proposta pela equação de Fredlund et al. (1978) parte do princípio que os parâmetros ϕ^b e ϕ' são constantes.

Para comprovar e verificar essa proposta de superfície plana e linearidade da relação entre sucção e resistência ao cisalhamento, foram obtidos resultados favoráveis de Fredlund et al. (1978), Gulhati e Satija (1981), Ho e Fredlund (1982), Rahardjo et al. (1995) e Feuerharmel (2007). A Figura 21, mostra a superfície de ruptura de um solo residual, encontrados por Rahardjo et al. (1994), onde ϕ^b ($24,3^\circ$) e ϕ' (26°) são constantes e demonstra a linearidade da relação sucção e resistência ao cisalhamento.

Figura 21 – Superfície planar de uma região de Singapura



Fonte: Modificado de Rahardjo et al (1995)

Porém, pesquisas mostram que falta uma maior gama de resultados, e assim, evidências experimentais posteriores questionaram a validade do critério de ruptura para solos não saturados planar.

Os principais aspectos, que comprovam essa divergência com os estudos de Fredlund et al. (1978) são mostrados em várias pesquisas (Tabela 3), que questionam os seguintes pontos: (i) A relação entre τ

versus sucção ($u_a - u_w$) pode ser não linear, (ii) O ângulo ϕ' pode variar com o aumento de sucção, (iii) o aumento da tensão líquida ($\sigma - u_a$) pode reduzir o efeito da sucção na resistência ao cisalhamento e (iv) o valor do ângulo ϕ^b encontrado para alguns solos pode ser superior a ϕ' (FEUERMANUEL, 2007).

Desse modo, diversos trabalhos reportam sobre a não-linearidade de um solo não saturado. A Tabela 3 apresenta algumas referências e informações sobre solos onde a relação entre τ *versus* sucção ($u_a - u_w$) varia de forma não linear.

Tabela 3 – Pesquisas com relação resistência x sucção não linear

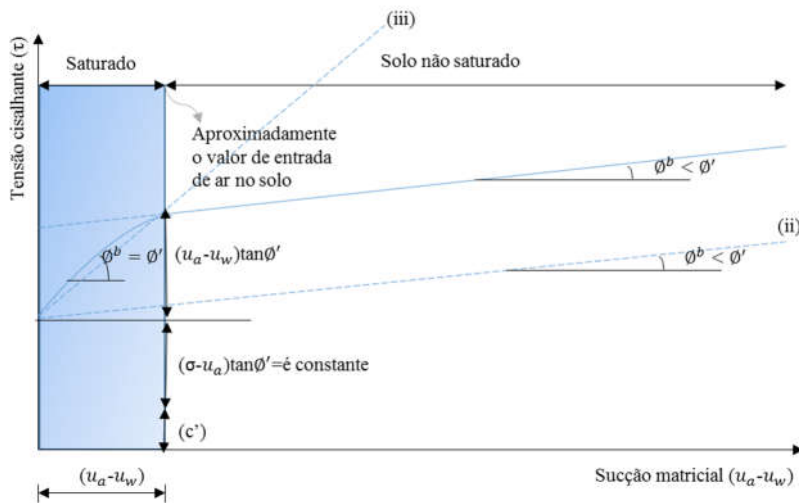
Referência	Tipo de Solos	Ensaio Realizado	Sucção (kPa)	τ x ($u_a - u_w$)
Donald (1956)	Solos arenosos	Cisalhamento direto	0-40	Não linear (decrecente após pico)
Escario e Saéz (1986)	Argila cinza, argila vermelha e areia argilosa	Cisalhamento direto	0-15000	Não linear (elipse de grau 2,5)
Delage et al. (1978)	Solo siltoso de baixa plasticidade	Triaxial (consolidado drenado)	0-800	Não linear (crescente)
Gan et al. (1988)	Solo Glacial	Cisalhamento direto	0-500	Não linear (levemente crescente)
Abramento e Pinto (1993)	Solo coluvionar (serra do mar)	Triaxial drenado	0-60	Não linear (função exponencial)
Campos e Carrillo (1995)	Solo coluvionar e residual	Cisalhamento direto	0-210	Não linear (função polinomial)
Drumright e Nelson (1995)	Solo arenoso	Ensaio triaxiais	0-150	Não linear (função crescente)
Bastos et al. (2001)	Solos residuais de origem granítica.	Cisalhamento direto	0-300	Não linear (função hiperbólica)
Reis e Vilar (2004)	Solos residuais de gnaiss	Triaxial (drenado)	0-320	Não linear (função hiperbólica)
Oliveira (2004)	Solo residual de gnaiss compactado	Compressão simples e triaxial	0-300	Não linear (função hiperbólica)
Soonkie Nam et al. (2011)	Depósito quaternário aluvial	Cisalhamento direto multi estágios	0-290	Não linear (exponencial)
Kühn e Gitirana (2015)	Solo tropical laterítico-argila de baixa plasticidade	Triaxial a umidade constante	0-10000	Não linear
Pecapedra (2015)	Residual de diabásio e granito (compactado)	Compressão simples	0-1000	Não linear (função crescente com estabilização nas sucções finais)

Fonte: Adaptado de Feuerhamel (2007) com dados atuais

Assim, observamos que o solo é uma estrutura complexa e vários fatores podem estar influenciando seus parâmetros de resistência. No entanto, estudos de Fredlund et al. (1987), admitem a não linearidade da envoltória de ruptura, e sugerem diversas maneiras de se trabalhar com a não linearidade da envoltória.

De acordo com a Figura 22, com relação a projeção τ versus sucção ($u_a - u_w$) sugerem que: (i) A envoltória pode ser adotada como bilinear, (ii) Pode-se utilizar uma envoltória linear mais conservadora que parte da sucção mátrica igual a zero, com inclinação $\phi^b < \phi'$, (iii) A envoltória pode ser discretizada em diversos segmentos lineares, quando a tendência da não linearidade for grande, (iv) linearizar a envoltória trasladando a porção de baixas sucções (menores que o valor de entrada de ar) para o plano τ versus $(\sigma - u_a)$, pois neste trecho $\phi^b = \phi'$, para sucções maiores, considerar uma envoltória linear no plano τ versus $(u_a - u_w)$ começando na sucção correspondente ao valor de entrada de ar com inclinação $\phi^b < \phi'$ (FREDLUND et al, 1987).

Figura 22 – Análises sugeridas para as envoltórias não lineares

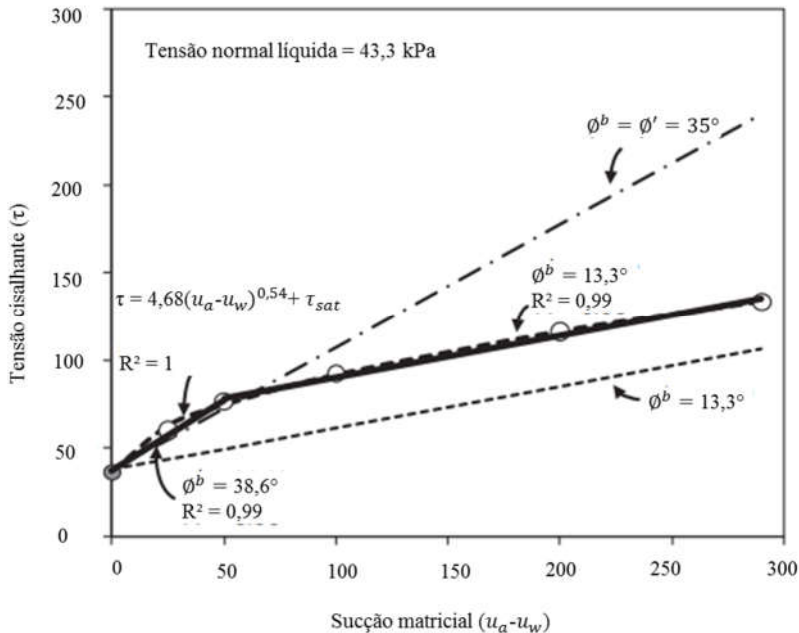


Fonte: Modificado de Fredlund et al. (1987)

Estudos de Soonkie et al. (2011), utilizaram amostras indeformadas de um depósito quaternário, e através de ensaios de cisalhamento de multiestágios obtiveram valores de sucções diferentes a tensão líquida constante. Esse estudo utilizou a proposta de Fredlund et

al. (1978) que se ajustou bem a função exponencial encontrada (Figura 23).

Figura 23 – Diferentes interpretações de tensão cisalhante versus sucção



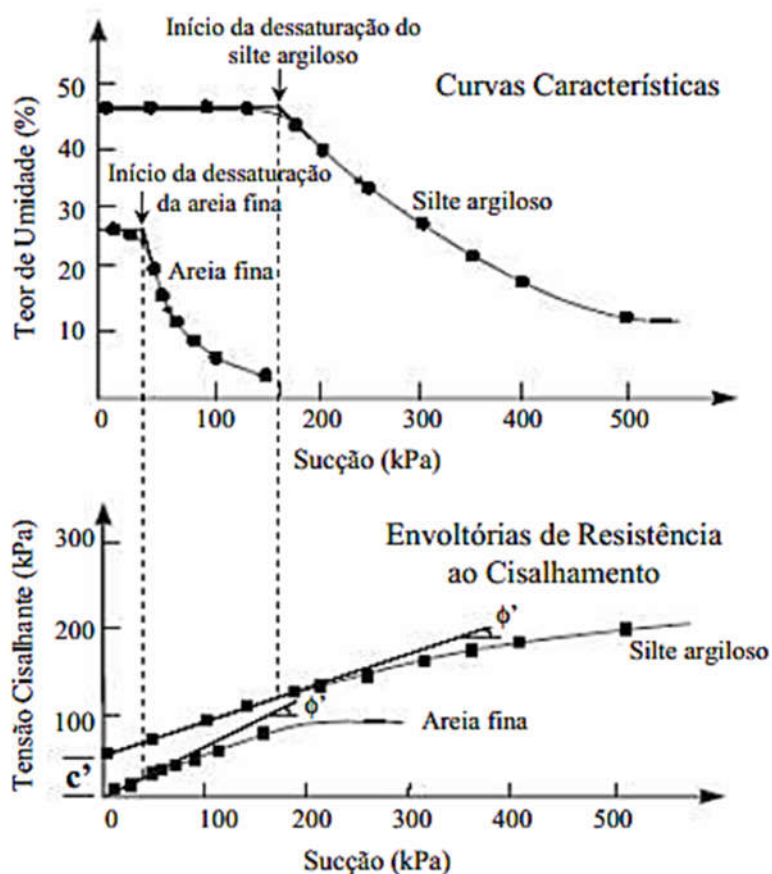
Fonte: Modificado de Soonkie et al. (2011)

No entanto, uma possibilidade de comprovar essa não linearidade é através da curva de retenção característica do solo; onde existe uma relação entre a taxa com que a resistência ao cisalhamento varia em condições não saturadas e a área do menisco de água em contato com as partículas do solo ou agregado (Vanapalli et al. 1996; Fredlund e Vanapalli, 2002).

Para exemplificar, a Figura 24 apresenta uma relação entre a curva característica do solo e a envoltória de resistência ao cisalhamento de dois solos não saturados (silte argiloso e areia fina). A resistência ao cisalhamento aumenta linearmente com a sucção até atingir o valor o valor de entrada de ar (VEA), onde neste trecho $\phi^b = \phi'$. Após esse valor, ocorre um aumento não-linear de resistência até que as condições residuais sejam alcançadas, ou seja, ϕ^b passa a ser menor que ϕ' . A partir do ponto residual da curva (sucções altas), a resistência ao cisalhamento

pode aumentar, diminuir ou permanecer constante dependendo do tipo de solo, estudos de Gan e Fredlund (1996), diz que este comportamento vai depender da taxa de dessaturação e da quantia de dilatação do solo durante o cisalhamento.

Figura 24 – Relação entre curva característica e envoltória de resistência ao cisalhamento

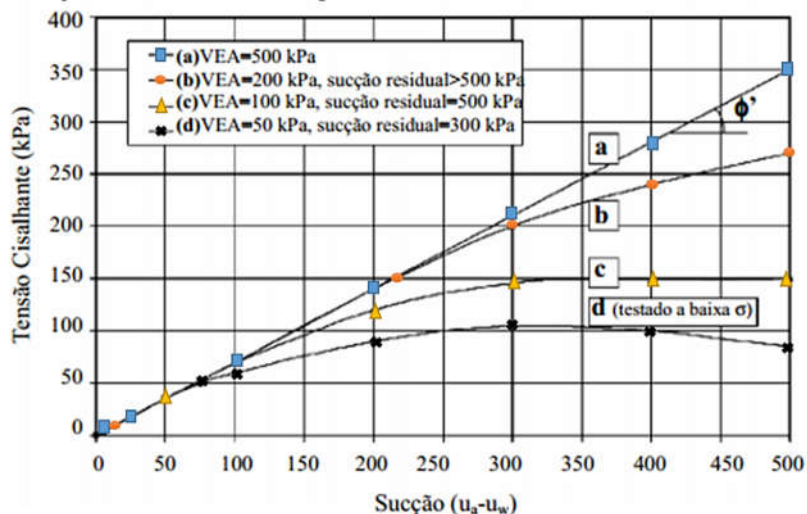


Fonte: Modificado Fredlund et al. (1996)

Por outro lado, Rassam e Cook (2002, apud FEUERHAMEL, 2007) fizeram uma representação gráfica geral para a envoltória de ruptura de um solo não saturado, ao qual é apresentada na Figura 25. O solo (a) tem um valor de entrada de ar maior que 500 kPa e uma envoltória de ruptura perfeitamente linear até esse valor de sucção. O solo (b)

apresenta uma envoltória composta de duas porções: uma linear até o valor de entrada de ar (200 kPa), onde o solo ainda encontra-se saturado, e uma porção não linear, que se inicia com a dessaturação e vai até a sucção residual. Quando as condições residuais são alcançadas, a contribuição da sucção mátrica na resistência ao cisalhamento pode tornar nula (solo c) ou diminuir solo (d), dependendo do tipo de solo. Dessa forma, para sucções maiores que o valor residual. Desse modo, o ângulo ϕ^b pode ser positivo, nulo ou negativo.

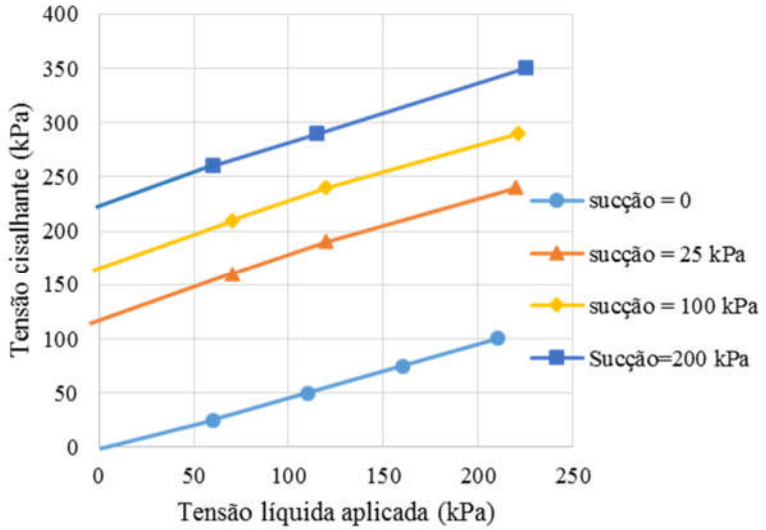
Figura 25 – Diferentes interpretações de tensão cisalhante versus sucção



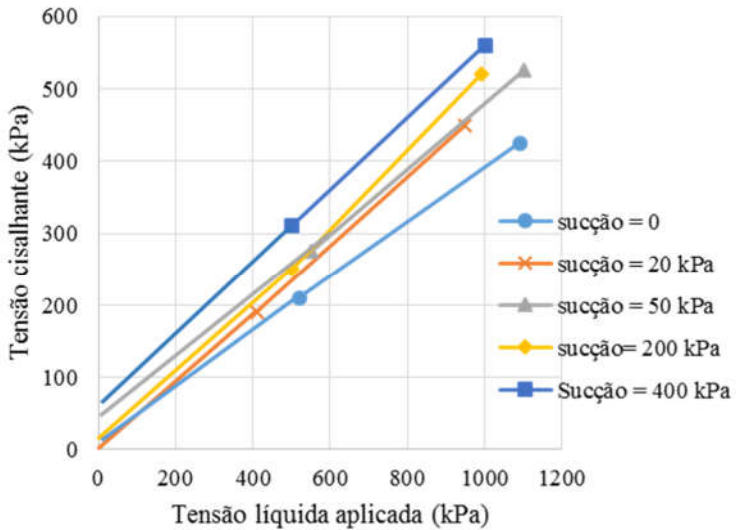
Fonte: Modificado de Rassam e Cook (2002, apud FEUERHAMEL 2007)

Voltando a outro aspecto que interfere na linearidade: a respeito do valor do ângulo ϕ' , existe a dúvida de que ele pode variar com o aumento de sucção. Algumas pesquisas apresentaram resultados experimentais nos quais ocorrem variação do ângulo de atrito interno com sucção, porém nenhuma explicação para esta variação foi justificada. Estudos de Delage et al. (1987), apresentados na Figura 26(d), indicaram um decréscimo no valor de ϕ' com o aumento da sucção. No entanto, estudos realizados por Soares et al (2005) em um solo coluvionar, apresentados na Figura 26a, mostram que ϕ' permanece constante com o aumento de sucção. Em contrapartida, estudos realizados por Rohn e Vilar (1995), apresentados na Figura 26 (c), encontraram um aumento de ϕ' em sucções que variam de 0 a 400 kPa, tendência oposta a obtida por Delage et al. (1987).

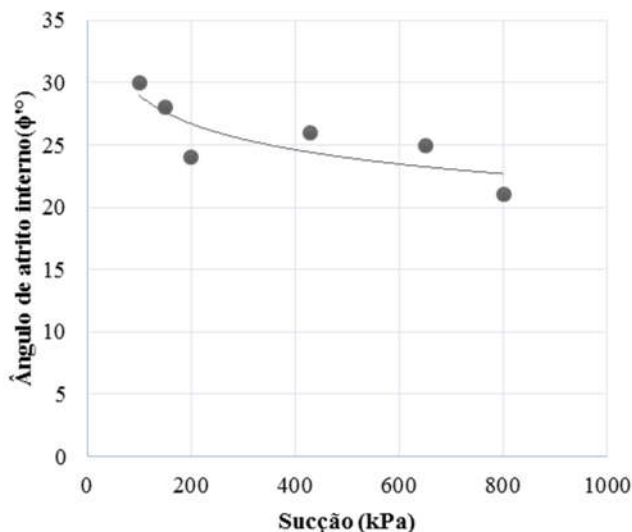
Figura 26 – Influência da sucção no ângulo de atrito (ϕ')



(a) Solo coluvionar de Soares et al. (2005)



(c) Solo arenoso laterítico de Rohn e Vilar (1995)



(d) Solo siltoso de Delage et al. (1987)

Fonte: Modificado pelo Autor

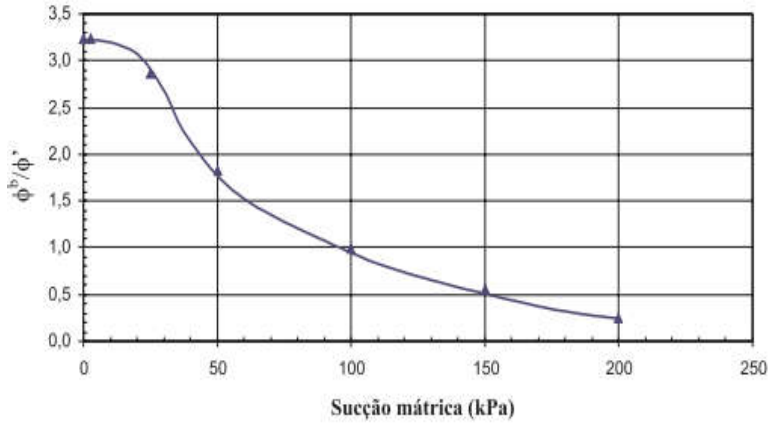
Outro ponto de vista, que merece destaque é sobre o parâmetro ϕ^b em relação ao ϕ' . As propostas de Fredlund et al. (1978) diz que o ângulo ϕ^b será sempre menor ou igual ao ângulo ϕ' . Entretanto, com a realização de pesquisas em diferentes tipos de solo, começou-se a observar uma situação diferente da esperada, onde, para alguns níveis de sucção o valor de ϕ^b é maior que ϕ' (PEREIRA, 2013).

O Trabalho de um solo coluvionar de Soares et al. (2005), mostram que a relação ϕ^b/ϕ' é maior que 1 para baixas sucções (Figura 27). Campos (1997) diz que não tem explicação física aceitável para isto, porém esta relação ser maior que a unidade, implica que o incremento na sucção matricial tem uma maior contribuição na resistência ao cisalhamento do que o mesmo incremento de tensão normal líquida para o intervalo considerado.

Alguns trabalhos como: de Campos (1997), Pereira (2006), Feuerharmel (2007) e Guizelini (2011) apresentam resultados que a variação do ângulo ϕ^b é maior que o ângulo de atrito. A Figura 28 é relacionada com os trabalhos de Guizelini (2011), e corresponde a um gráfico tridimensional, representando os valores de um solo com 45% de silte, 30% de argila e 25% de areia fina, onde através da projeção é

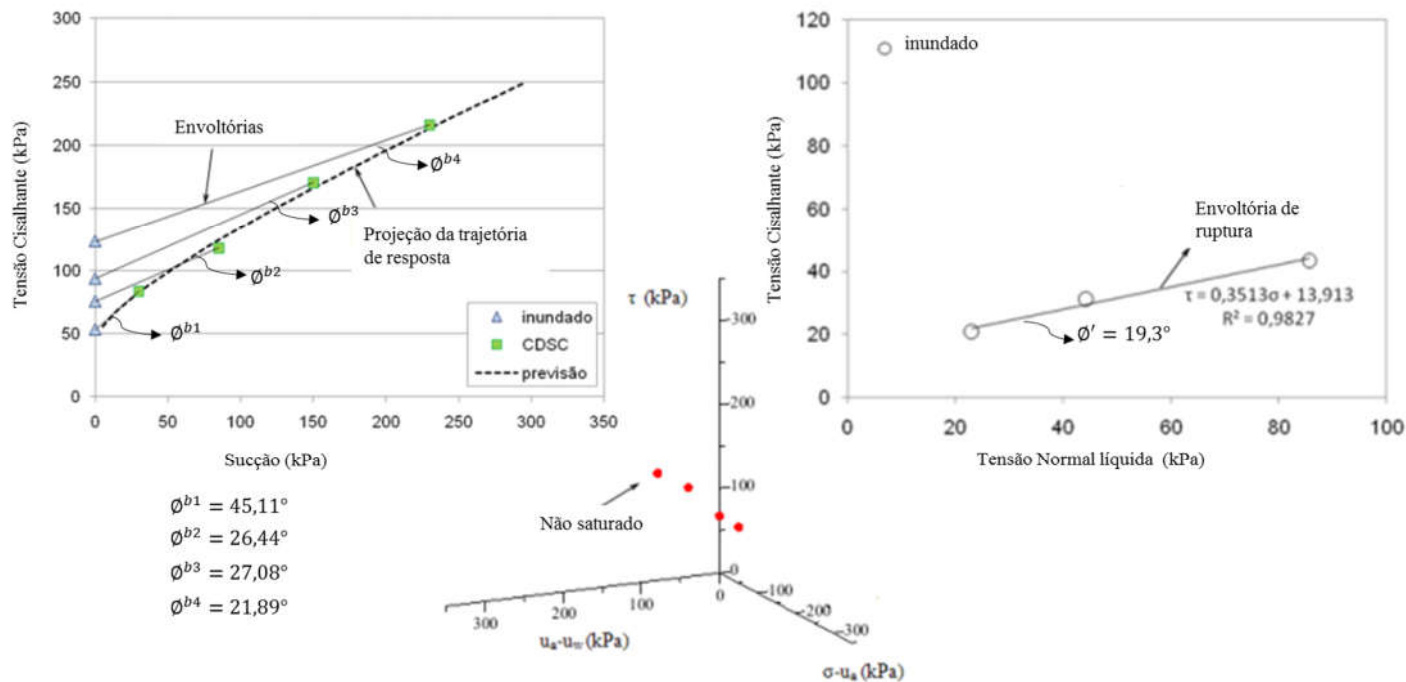
possível verificar que o ângulo ϕ^b (21,8 a 45°) é maior que ϕ' (19,3°) obtido experimentalmente.

Figura 27 – Variação de ϕ^b/ϕ' em relação a sucção



Fonte: SOARES et al. (2005)

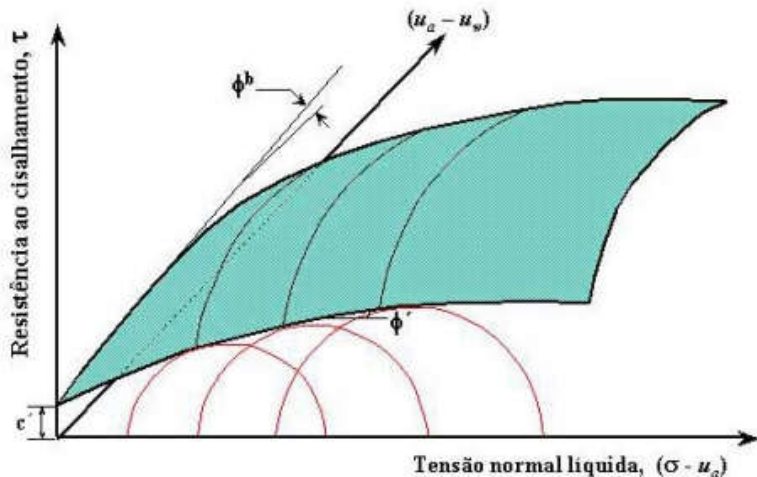
Figura 28 – Envoltória de Resistência de Solos não saturados e suas projeções



Fonte: Adaptado de Guizelini (2011); CDSC=cisalhamento direto sucção controlada

Assim, a variação dos parâmetros do solo ϕ^b e ϕ' discutidas implicam que uma envoltória geral de resistência dos solos não saturados deve ser representada por uma superfície curva, conforme Figura 29 (CAMPOS, 1997).

Figura 29 – Superfície da envoltória de resistência de solos não saturados



Fonte: CAMPOS (1997)

A Figura 29, representa um possível formato de tal superfície, onde há a variação de ϕ^b e ϕ' .

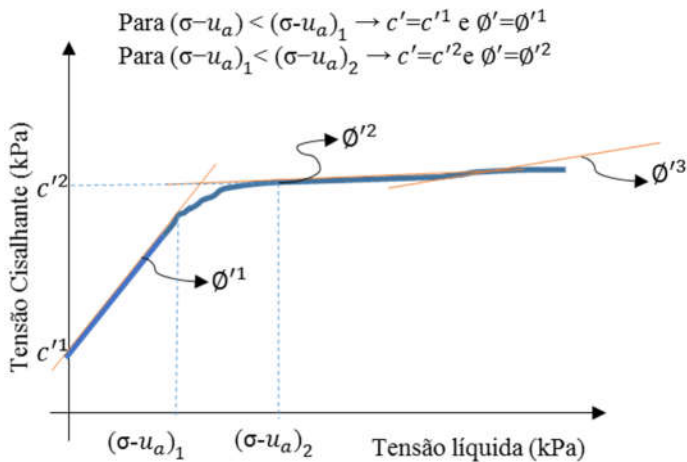
Inexistem entretanto, hoje, dados experimentais de qualidade que possibilitem uma plena definição desta superfície, em particular no caso de solos tropicais indeformados. Tal porém, não impede que os conceitos básicos de resistência ao cisalhamento de solos não saturados possam ser aplicados na prática geotécnica (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

Desse modo, os conceitos básicos de resistência ao cisalhamento de solos não saturados podem ser aplicados na prática geotécnica. No caso de problemas de estabilidade de taludes, é perfeitamente possível trabalhar com envoltórias de resistência multilíneas nos eixos projeção

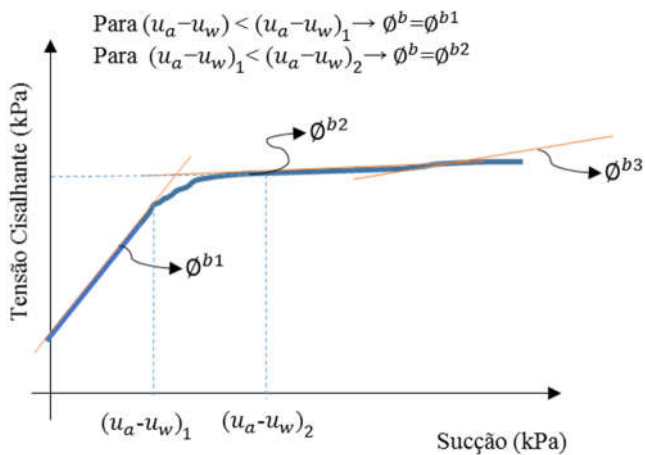
τ versus sucção ($u_a - u_w$) e projeção τ versus tensão líquida ($\sigma - u_a$) (CAMPOS, 1997).

Conforme exemplificado na Figura 30, isto só requer a introdução em programas de análise convencionais de estabilidade, de limites de validade de variações lineares dos parâmetros de ϕ^b e ϕ' em relação a valores pré-definidos de $(\sigma - u_a)$ e sucção ($u_a - u_w$) (CAMPOS, 1997).

Figura 30 – Representação de envoltória não saturada multilinear



(a) Representação de variações de ϕ'



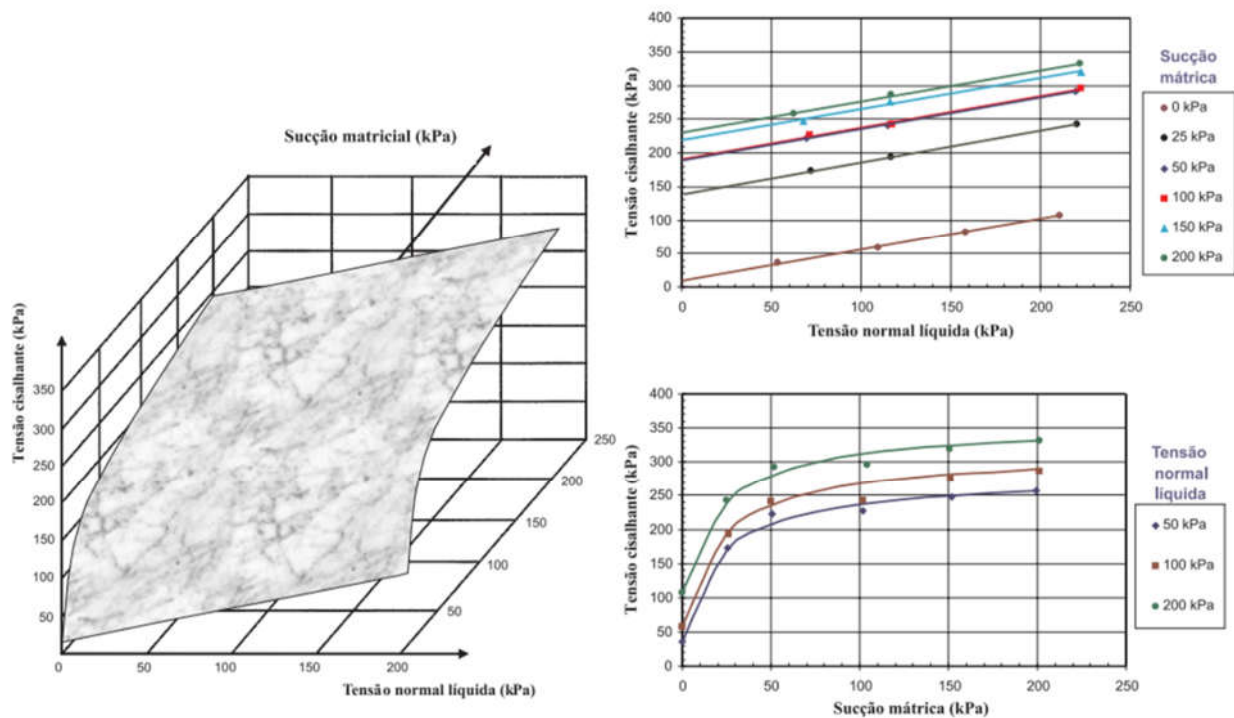
(b) Representação de variações de ϕ^b

Fonte: Modificado de Campos (1997)

Logo, ao se ter valores variáveis de ϕ' e ϕ^b das diferentes retas, obterá variações nos parâmetros c' ou c , que devem também ser consideradas (CAMPOS, 1997).

Para solidificar o entendimento, a Figura 31, mostra o estudo de Soares et al. (2005); onde através de ensaios experimentais de cisalhamento com sucção controlada, realizados em amostras indeformadas, de um solo coluvionar não saturado do Rio de Janeiro; obteve uma superfície de ruptura tridimensional. Verificou que este solo apresentou uma não linearidade nas envoltórias de resistência em relação à sucção e que o elevado valor de ϕ^b encontrado a baixa sucção, possivelmente está associado ao aspecto da curva característica. O comportamento do solo ficou bem representado por uma função hiperbólica.

Figura 31 – Envoltória de Resistência de Solos não saturados e suas projeções



Fonte: Adaptado de Soares e Campos. (2005)

2.5 ENSAIOS LABORATORIAIS

Para se atingir o objetivo geral e os objetivos específicos propostos nesta dissertação foram realizados ensaios de caracterização, ensaios com utilização da técnica do papel filtro, para determinação da curva de retenção de água e da sucção inicial dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência ao cisalhamento.

Considerações relacionadas as principais técnicas experimentais envolvendo os ensaios executados nesta pesquisa são sucintamente apresentadas neste item, com ênfase nos ensaios de resistência ao cisalhamento. Por conta disso, será dado mais ênfase aos ensaios de resistência ao cisalhamento (cisalhamento direto não saturado) e obtenção de sucção (pelo método do papel filtro).

2.5.1 Medição de sucção no solo

A medição de propriedades de solos não saturados exige o emprego de técnicas para medição e controle da sucção do solo, sempre com o objetivo de determinar parâmetros para análise e/ou previsão do comportamento do material. Logo, é importante compreender a diferença entre processos de medição e imposição de sucção, tipo de sucção medida e tempo de resposta de cada técnica ou sensor utilizado. Além disso, a natureza do mecanismo de interação entre o sensor empregado e a água do solo possui grande influência na forma de interpretação dos resultados obtidos (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

Desse modo, no decorrer dos anos, têm-se observado o emprego de muitos esforços para compreender os processos envolvidos na medida de sucção dos solos. Inúmeros equipamentos vêm sendo desenvolvidos e adaptados. Esses equipamentos se dividem em duas classes: os que fazem medias indiretas e os que fazem medidas diretas de sucção.

Um método é considerado direto quando a energia do poro-água (sucção) é medida diretamente. Por outro lado, quando a sucção é estimada a partir de correlações com propriedades ou parâmetros do solo o método é considerado indireto (FEUERHARMEL, 2007).

Existe uma grande variedade de técnicas para a medição da sucção do solo no campo e em laboratório. Na Tabela 4 estão apresentadas as técnicas mais utilizadas para medir sucção e os níveis de sucção de aplicação de cada técnica.

Tabela 4 – Métodos de medida de sucção

Método de Medida/Tipo de sucção	Faixa de medida (kPa)	Observações
Blocos Porosos (Matricial)	10 a 1000	<ul style="list-style-type: none"> - Baseia-se na condutividade elétrica de materiais porosos como gesso, a fibra de vidro etc, bem como da resistência elétrica (ohms x Sucção); - Desvantagens: solubilidade do gesso, histerese pronunciada, mais sensível às altas sucções; - Tempo de equilíbrio: Semanas
Equilíbrio da fase vapor (Total)	Acima de 400	<ul style="list-style-type: none"> - Solução com concentração conhecida; Umidade relativa; sucção total; - Amostra de solo em dessecador sem contato com a solução até o equilíbrio de peso; - Tempo de equilíbrio: demorado
Extrato da solução do solo (Osmótica)	Todos os valores	<ul style="list-style-type: none"> - Condutividade elétrica do extrato da solução; - Concentração de solutos; - Extrato + psicrômetros: Resultados precários
Funil de pedra porosa (Matricial)	0 a 90	<ul style="list-style-type: none"> - Sucção aplicada diretamente à amostra - Indicado para determinar baixas sucções; - Tempo de equilíbrio: horas
Membrana de pressão	Até 10000	<ul style="list-style-type: none"> - Emprega a técnica de translação de eixos; - Emprega a membrana de celulose; -Tempo de equilíbrio: Dias
Papel filtro com e sem contato (Matricial/Total)	30 a 30000	<ul style="list-style-type: none"> -Depende do contato com o solo, que deve ser garantido; -Necessita de calibração do papel - Evitar formação de fungos nos papéis mais umedecidos; - Pesagem com precisão de 0,0001g; - Tempo de equilíbrio: 7 a 30 dias
Placa de pressão (matricial)	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> -Emprega a técnica da translação de eixos; -Depende da pressão de entrada de ar da pedra porosa; -Continuidade da fase ar; -Tempo de equilíbrio: Horas
Princípios osmóticos (Matricial)	200 a 1600	<ul style="list-style-type: none"> -Solo em contato com solução com concentração conhecida (umidade relativa conhecida) através de membrana seletiva; -Útil para instalar e controlar sucção em ensaios; - Tempo de equilíbrio: Horas
Psicrômetros (total/osmótica)	100 a 8000	<ul style="list-style-type: none"> -Depende de rigoroso controle de temperatura, principalmente em baixas sucções; recomendado em laboratório; - Sucção osmótica; mede sucção de extrato da solução do solo (confiabilidade precária) - Tempo de equilíbrio: Horas.
Tensiômetro Padrão (matricial)	0 a 100	<ul style="list-style-type: none"> -Tempo de resposta: depende da condutância da pedra porosa e sensibilidade do elemento de medida; - Existem tensiômetros baseados em princípios osmóticos; -Tempo de equilíbrio: minutos
Tensiômetro de alta capacidade	0 a 1500	<ul style="list-style-type: none"> -Medem a sucção abaixo de -1 atm, até uma sucção de 1500 kPa;

(TAC)
(matricial)

- Tiram partido da elevada resistência à tração da água
e tem curto tempo de resposta.

Fonte: VILAR (2006) apud FREITAS (2008)

Detalhes sobre essas técnicas podem ser encontradas em Marinho e Pereira (1998), Marinho (2005), Vanapalli et al (2004), Carvalho et al. (2015), entre outros. A seguir será apresentada uma descrição da técnica experimental utilizada para obtenção de sucção e da curva característica de retenção nesta pesquisa: A técnica do papel filtro.

2.5.1.1 Técnica do Papel Filtro

A utilização do papel filtro veio através de estudos iniciais de Shull (1916), Hansen (1926) e Gardner (1937). Mais tarde, com o processo industrial envolvido na produção, trouxe mais credibilidade ao método como material absorvente, pois garantiu que as características de absorção de cada papel fosse a mesma e independente de caixa ou lote.

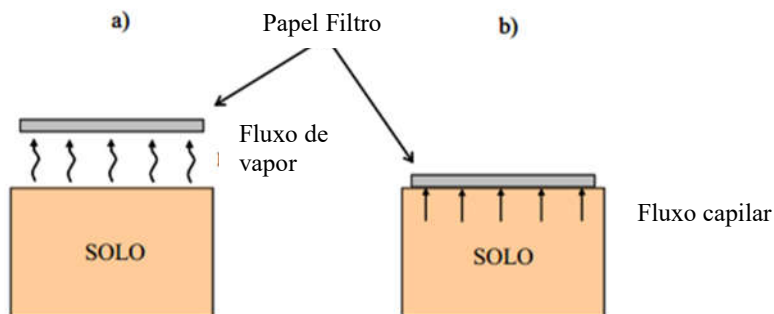
A técnica do papel filtro baseia-se na hipótese que, para uma dada sucção, a umidade do papel filtro estará em equilíbrio com a do solo. Assim, um solo, com alguma umidade, quando é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor, faz com que este último absorva uma certa quantidade de água do solo até que a sucção de ambos, seja igual, no entanto, este fato não significa que ambos esteja com o mesmo teor de umidade. O tempo de equilíbrio é um fator de extrema importância para obtenção da sucção correta (MARINHO, 1994).

De forma resumida, este método consiste em determinar a sucção de um solo qualquer de forma indireta, ou seja:

- Com a amostra de solo, coloca-se o papel filtro em contato direto ou separada com algum tipo de espaçador, sendo posteriormente envolto em filme plástico e colocado em um ambiente com temperatura controlada;
- Dependendo da forma que é colocada ao solo haverá o tempo de equilíbrio, para que a água passe para o meio poroso e que haja a igualdade de sucção;
- Após o tempo de equilíbrio, retira-se o papel filtro do solo e se determina o seu teor de umidade;
- Com a umidade do papel filtro correspondente, é obtido a sucção, através da curva de calibração ou equações fornecidas por cada fabricante do papel;
- Assim, a sucção encontrada corresponde a mesma do solo.

Na situação de fluxo de vapor as moléculas de água têm que escapar da água de poro vencendo as forças capilares no solo e eventualmente forças osmóticas que agem devido a presença de sais. O espaço de ar deixado entre o solo e o papel filtro (Figura 32), fornece uma barreira para os sais, permitindo apenas o fluxo de vapor de água. O fluxo capilar ocorre através das partículas do solo e das fibras do papel filtro, sem que a água perca continuidade. Assim, quando o fluxo ocorre através de vapor o papel filtro medirá sucção total, uma vez que estará incorporando forças osmóticas e capilares que retêm a molécula da água. Para fluxo em contato, e ocorre apenas por capilaridade é medida a sucção matricial (MARINHO et al, 1998).

Figura 32 – Tipos de fluxos do solo para o papel filtro



Fonte: MARINHO et al. (1998)

Sobre a dúvida do tempo de equilíbrio que o papel filtro ficará até atingir a sucção do solo, estudos de Gracen et al. (1987) mostram que a velocidade de absorção do papel filtro vai depender do nível de sucção: para sucções altas o tempo para a água atingir uma determinada distância é maior que baixas sucções. No entanto, para sucções matriciais, grande parte da água é absorvida nos primeiros minutos e atinge o equilíbrio em aproximadamente 7 dias.

Dentro do que foi argumentado, a Tabela 5 fornece sugestões para tempo de equilíbrio em função do nível de sucção total para o papel filtro da marca Whatman nº 42. Para sucção matricial o tempo de equilíbrio sugerido é de no mínimo 7 dias.

Tabela 5 –Sugestão para tempo de equilíbrio para medição de sucção total em função do nível de sucção

Nível de Sucção Total (kPa)	Tempo de equilíbrio sugerido (dias)
0-100	Não determinado, mas certamente maior que 30
100-250	30
250-1000	15
1000-30000	7

Fonte: MARINHO et al. (1998)

Para retirar a umidade do papel é necessário ter bastante cuidado, pois o material é muito delicado e qualquer descuido pode haver erros. Para isso é necessário: Balança analítica de no mínimo 4 casas decimais, sacos plásticos isolantes para reter a umidade, pinça (para retirar do solo) e estufa (105°). Além disso os papéis filtros utilizados são os quantitativos, tipo 2 e as marcas mais comuns no mercado são: Whatman n° 42 e Schleicher e Schuell n° 589.

O teor de umidade do papel filtro define de forma indireta, através da sua curva de calibração, a sucção do solo. A Tabela 6 mostra algumas equações de calibração propostas para esses papéis e a figura 33 mostra um gráfico de calibração proposto para o papel filtro da marca Whatman n° 42.

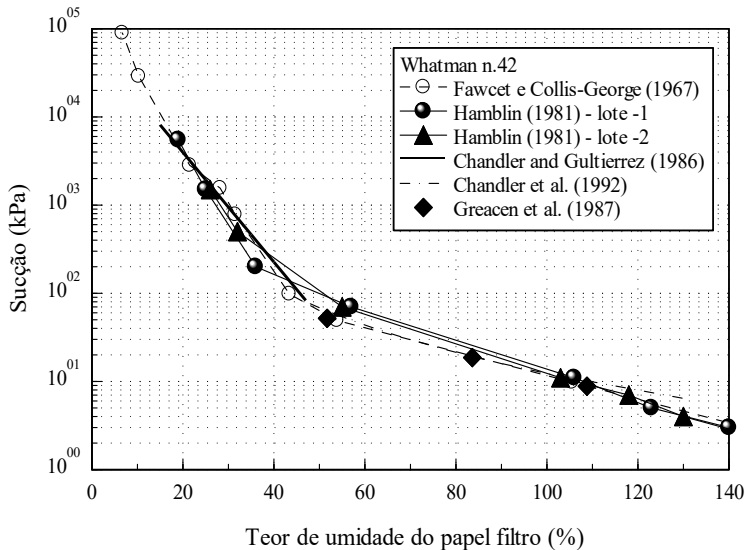
Leong e Rahardjo (2002) examinaram os dados de calibração dos papéis filtro Whatman n° 42 e Schleicher e Schuell n° 589 e verificaram que o papel que apresenta maior consistência e menor dispersão é o Whatman n° 42, cabe ressaltar que estudos de Oliveira (2004) demonstraram que, para uma caixa específica desse papel, foram encontradas algumas discrepâncias, recomendando, assim, antes de utilizar o papel filtro, seja realizada uma verificação da curva de calibração do papel.

Tabela 6 –Curvas de calibração para papéis Whatman n° 42 e Schleicher e Schuell n° 589

Referência	Curva de Calibração
Whatman n° 42	
Chandler et al. (1992)	$\Psi(kPa) = 10^{4,84-0,062w_f}$ $w_f < 47$
	$\Psi(kPa) = 10^{6,05-2,48\log w_f}$ $w_f \geq 47$
Greacen et al. (1987)	$\Psi(kPa) = 10^{5,327-0,0779w_f}$ $w_f < 45,3$
ASTM (1994)	$\Psi(kPa) = 10^{2,413-0,0135w_f}$ $w_f \geq 45,3$
Schleicher e Schuell n° 589	
Al-Khafaf e Hanks (1974)	$\Psi(kPa) = 10^{4,136-0,0337w_f}$ $w_f < 85$

	$\Psi(kPa) = 10^{2,0021-0,009w_f}$	$w_f \geq 85$
Mc Keen (1980)	$\Psi(kPa) = 10^{4,9-0,0624w_f}$	$w_f < 66$
	$\Psi(kPa) = 10^{1,25-0,0069w_f}$	$w_f \geq 66$
Greacen et al. (1987)	$\Psi(kPa) = 10^{5,056-0,0688w_f}$	$w_f < 54$
ASTM (1994)	$\Psi(kPa) = 10^{1,882-0,0102w_f}$	$w_f \geq 54$
Ψ = sucção (kPa); w_f = teor de umidade do papel filtro (%)		
Fonte: FEUERHARMEL (2007)		

Figura 33 – Gráfico das curvas de calibração para o papel filtro Whatman n° 42



Fonte: MARINHO et al. (1994)

O interessante deste método é sua facilidade por ser um método simples e barato, por ter essa facilidade o papel filtro é bastante utilizado em obtenção de curva característica de retenção. No entanto, é necessário bastante cuidado na execução e interpretação de seus resultados. Medidas confiáveis dependem de uma série de fatores como: (i) tipo de contato, (ii) tempo de equilíbrio, (iii) histerese do papel; (iv) determinação do teor de umidade do papel filtro; (v) número de papéis, e (vi) flutuação da temperatura (FEUERHAMEL, 2007).

A metodologia para medir a sucção do solo pelo papel filtro é encontrada na norma americana ASTM D5298-92. Outros procedimentos podem ser consultados em Marinho (1994), Marinho et al. (1998) etc.

2.5.2 Ensaio de Resistência com medida de sucção

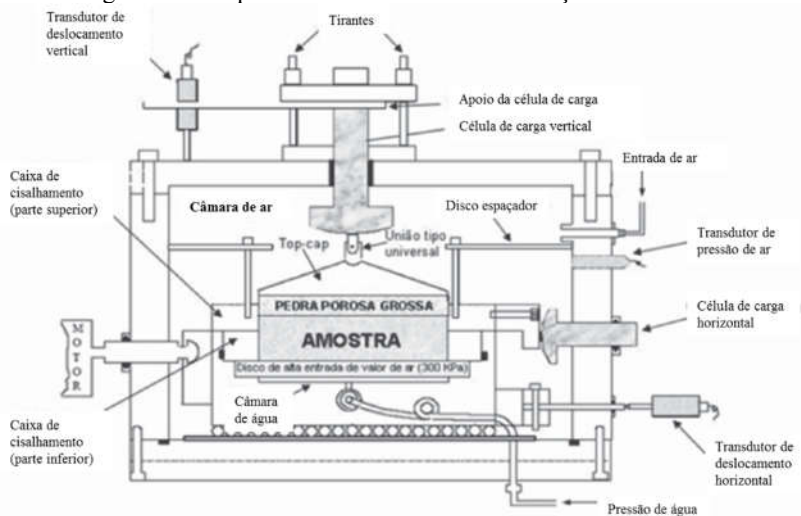
Atualmente, existem máquinas capazes de controlar a sucção enquanto é medida a resistência, os mais comuns são: ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais. Esses ensaios originaram de estudos de solos saturados, porém com modificações devido a necessidade de controlar e saber a sucção e variação de volume da estrutura. Blight (2013), enfatiza que a execução de tais ensaios ainda é rara na prática geotécnica dos solos não saturados.

Um equipamento bastante utilizado para a determinação da resistência ao cisalhamento de solos não saturados é o cisalhamento direto com sucção controlada, onde é utilizada a técnica de translação de eixos para controle de sucção.

A translação de eixos (Hilf, 1956) é uma técnica na qual se altera a origem (ou referência) da pressão de água da condição atmosférica para outra situação, em que a pressão “atmosférica” é aumentada (e.g. Marinho, 1997). Esse aumento artificial na pressão atmosférica faz com que as pressões de ar e de água sejam transladadas para valores de pressões positivos, mantendo a sucção mátrica constante (CARVALHO, GITIRANA JR, et al., 2015).

O equipamento (Figura 34) é uma modificação do convencional, sendo composto por uma câmara de pressão de ar, uma caixa de cisalhamento bipartida no interior dela, um disco de alto valor de entrada de ar instalado na base da caixa, um sistema de aplicação de pressões, um sistema de extração de bolhas de ar, um sistema de aplicação de carregamento vertical e um sistema de medição e aquisição de dados (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

Figura 34 – Esquema do cisalhamento com sucção controlada



Fonte: (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015)

O procedimento de ensaio, após a equalização da sucção, é similar ao convencional, em que as amostras são adensadas e o cisalhamento é do tipo drenado (BLIGHT, 2013).

A fase de adensamento é realizada através da aplicação da tensão normal vertical e das pressões de ar e água na amostra. Assume-se que essa etapa é finalizada quando variações do deslocamento vertical da amostra e do volume de água drenada são desprezíveis (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

O cisalhamento é realizado a partir da imposição de uma velocidade de deslocamento constante, acionando-se o motor elétrico do equipamento. A carga vertical e a força cisalhante horizontal são determinadas a partir de células de carga; medidas de deslocamento vertical e horizontal são feitas utilizando transdutores de deslocamento, e a variação de volume da água é medida por meio de um transdutor de variação de volume (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

Da mesma forma que no caso dos ensaios triaxiais, é fundamental que os ensaios de cisalhamento direto (drenados) sejam executados a uma velocidade de deslocamento que garanta que a sucção aplicada se mantenha constante (CARVALHO, GITIRANA JR, *et al.*, 2015).

Atualmente, devido à grande dificuldade de obter resultados de resistência com a unidade de sucção, e assim devido à falta de equipamentos que controle esses parâmetros; existem outras alternativas

para contornar essa problemática. Estudos de Feuerharmel (2007), com a utilização da técnica do papel filtro, obteve valores de sucção, com corpos de provas remoldados, e assim adaptou o equipamento de cisalhamento direto convencional. Ensaio de compressão simples de Pecapedra (2015), encontrou a resistência através de corpos de prova moldados com uma sucção estabelecida com a técnica do papel filtro.

Desse modo, para que resultados possam ser comparados, é importante que todas as amostras tenham as mesmas características iniciais (FREDLUND E RAHARDJO, 1993). Como o ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada não tem ainda uma norma existente, deve-se ser explicitado o processo e os parâmetros para obtenção dos dados e controle de sucção.

3 ÁREAS DE ESTUDO

Esta pesquisa tem como objeto de estudo os solos residuais da Ilha de Santa Catarina. Estudos mais recentes realizados por Tomazzoli e Pellerin, (2015), em termos geológico-geomorfológico, dividem a ilha de Santa Catarina em dois domínios fundamentais: a) domínio de morros, montanhas e elevações, definidos por migmatitos do Complexo Águas Mornas, pelos granitos Ilha e Itacorubi e por rochas vulcânicas ácidas da Suíte Cambirela, todos cortados por diques do Enxame Florianópolis; b) domínio das planícies costeiras que interligam essas elevações e são constituídas por depósitos quaternários inconsolidados, de origem variada.

Nas regiões mais elevadas da Ilha de Santa Catarina, estão os terrenos cristalinos (rochosos), Pré-Cambrianos com altitude de até 532 metros, no morro do Ribeirão. A morfologia geralmente é dada por sua disposição frequentemente alongada e a forte declividade de suas encostas (SANTOS, 1997).

Nas regiões de rochas cristalinas, os solos, via de regra, possuem espessura em torno de 1 metro (horizontes A+B), onde predominam os tipos Podzólico Vermelho-Amarelo. Isso ocorre nas regiões mais acidentadas, sendo menores a espessura, nos relevos menos acidentados (HERMANN, 1989 apud SANTOS, 1997).

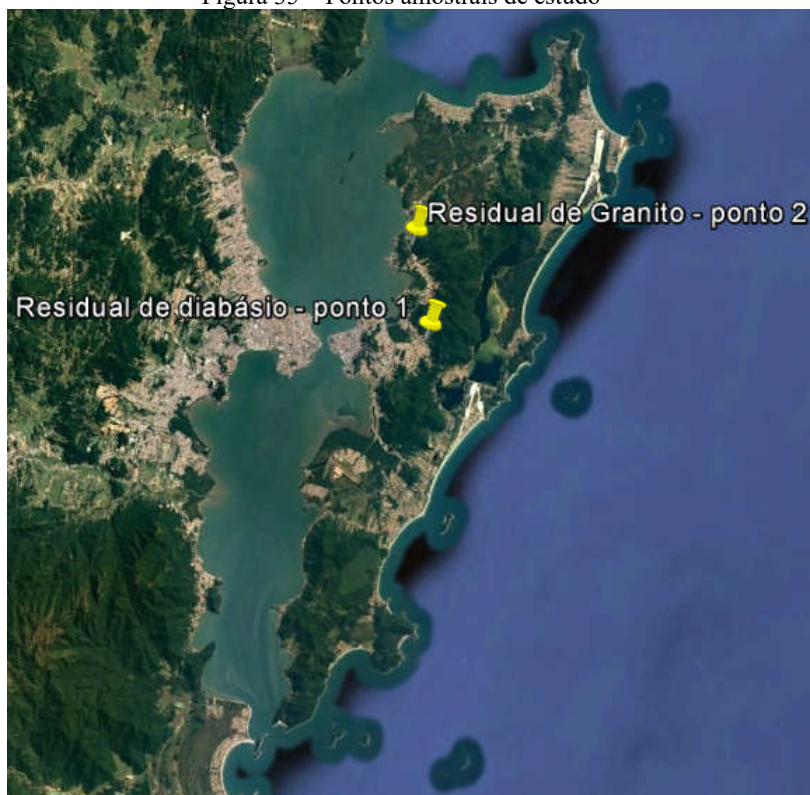
Segundo modelo de classificação de Koppen, as bacias do Itacorubi e Ribeirão das Pedras estão na zona subtropical, a qual representa clima mesotérmico úmido, com chuvas uniformes e bem distribuídas durante o ano, com temperatura média oscilando entre 18° e 15° C no inverno e entre 26° e 24° no verão, com temperatura média anual é de 20,4 ° C. Desse modo, A ilha de Santa Catarina apresenta características climáticas controladas pela atuação das massas Polar Marítima (Pa) e Tropical Marítima (Ta) do Atlântico (SANTOS, 1997).

A vegetação da Ilha de Santa Catarina pode ser caracterizada por dois tipos de formações vegetais: Florestais, Pioneiras e mangues. As Formações Florestais correspondem as matas primitivas e aos vários estágios de sucessão de mata secundária, que ocorrem nas encostas das elevações rochosas, onde estão os pontos amostras do estudo desta pesquisa (SANTOS, 1997).

Muitos dos movimentos de massa ocorridos na Ilha de Santa Catarina estão associados aos solos residuais de granito e de diabásio.

Esses pontos amostrais pertencem a microbacia do Itacorubi e a microbacia do Ribeirão das Pedras, localizados em Florianópolis-SC. Na microbacia do Itacorubi foi retirada amostras de solo de um dique de diabásio. O ponto de retirada de amostras do solo residual de granito está localizado na Unidade de Conservação Ambiental Desterro (UCADE) que está sobre os cuidados da Universidade Federal de Santa Catarina. Na Figura 35 estão apresentados os locais de estudo.

Figura 35 – Pontos amostrais de estudo



Fonte: Google Maps (2016)

Figura 37 – Imagem do dique de diabásio com indicação de afloramento de água pelas fraturas da rocha (Área 1)



Fonte: Autor

Figura 38 – Vista lateral do corte execução para construção (Área 1)

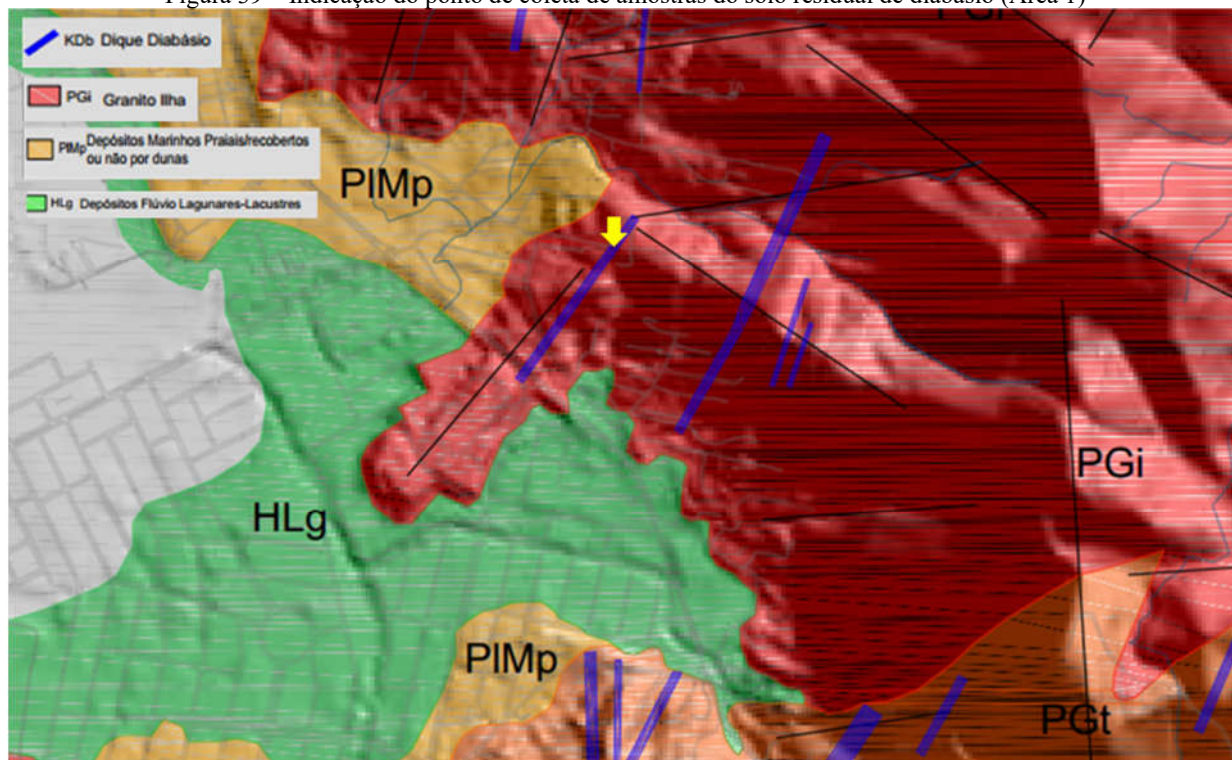


Fonte: Autor

A indicação da área de estudo 1 no mapa geológico da Ilha de Santa Catarina, desenvolvido por Tomazzoli e Pellerin (2014) está apresentada na Figura 39, observa-se que o mesmo está localizada sobre um dique de diabásio presentes na região.

Observando a Figura 39, percebe-se que a região do estudo deste ponto possui unidades geológicas: PIMp (depósito marinhos praias recoberto ou não por dunas), HLg (depósitos fluvil lagunares), PGt (granito Itacorubi), PGi (granito ilha) e um traçado roxo (indicação de dique de diabásio).

Figura 39 – Indicação do ponto de coleta de amostras do solo residual de diabásio (Área 1)

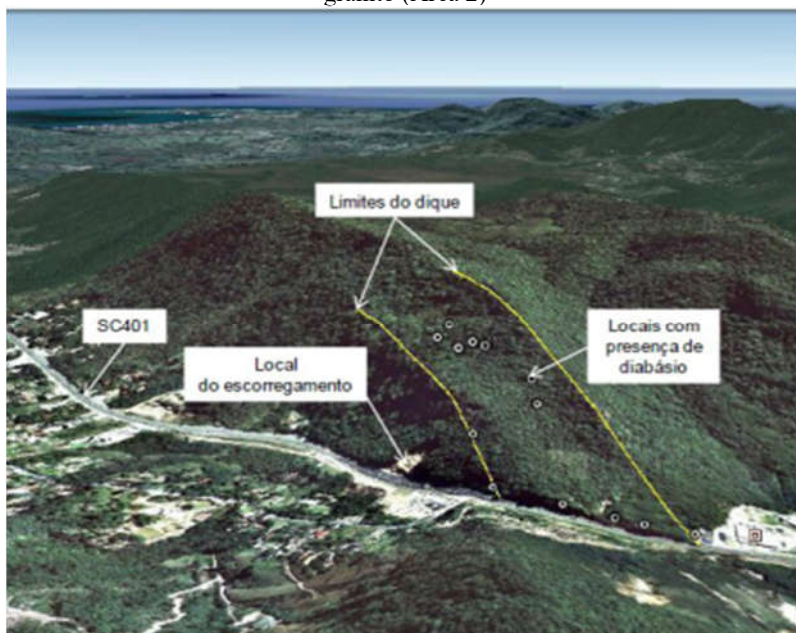


Fonte: TOMAZZOLI E PELLERIN (2015)

3.2 ÁREA DE ESTUDO 2: CACUPÉ

A área de estudo 2, está localizada no bairro de Cacupé nas coordenadas: UTM 745645,67E e 6948050,28S; nas margens da rodovia SC-401, e dentro da UCADE (Figura 40). Esta região de estudo é cortada por um dique de diabásio representado por um vale alinhado encaixado no maciço de granito. Em 2008 ocorreu neste local o maior movimento de massa da Ilha de Santa Catarina.

Figura 40 – Indicação do local de retirada de amostras de solo residual de granito (Área 2)



Fonte: Oliveira et al. (2012)

Nas Figura 41 e Figura 42 está indicado o local do ponto de estudo em solo residual de granito (Ponto 2). Na Figura 41 observa-se que o ponto de coleta de amostra está situado ao lado da cicatriz do movimento de massa ocorrido em 2008.

Figura 41 – Indicação do local de estudo no bairro Cacupé (Área 2)



Fonte: Google Maps (2016)

Figura 42 – Residual de granito- Área 2

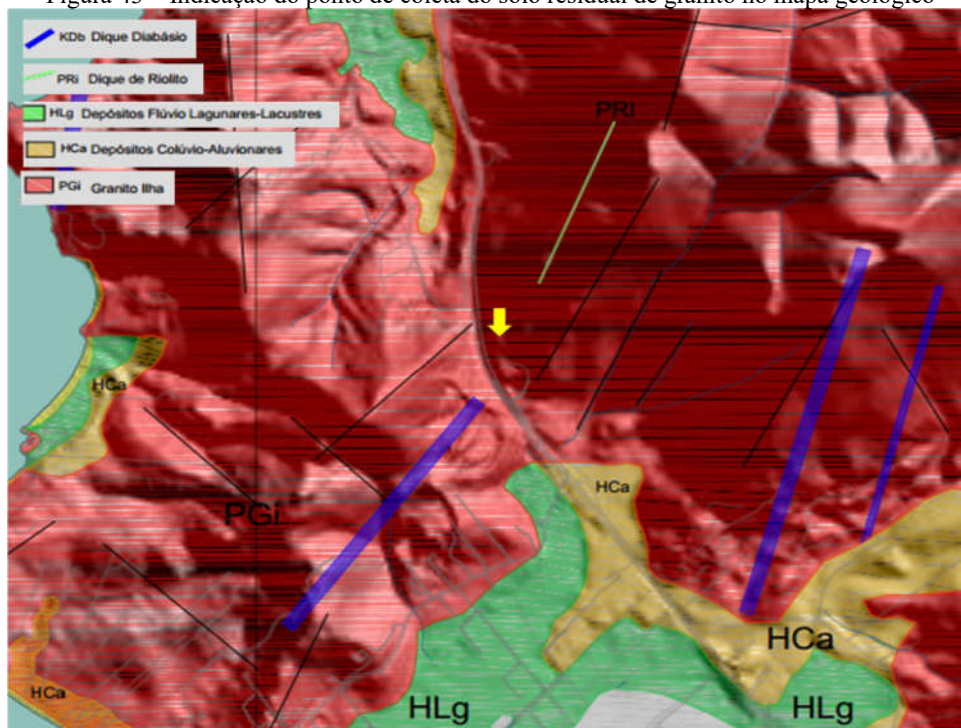


Fonte: Autor

De acordo com o mapa geológico da Ilha de Santa Catarina desenvolvido por Tomazzoli e Pellerin (2014), observa-se que a área de estudo está localizada sobre a região de Granito Ilha, e bem próximo a um dique de diabásio. A indicação da área 2 neste mapa geológico está apresentada na Figura 43.

Esta área, que se encontra na microbacia do Ribeirão das Pedras, já foi bastante estudado, devido a ocorrência de movimentos de massa. Estudos de Raimundo (1998), Oliveira et al (2012) e Bim (2014) mostram que esta microbacia possui duas unidades pedológicas bem distintas, classificadas como Podzólico Vermelho-Amarelo Álico (PVa 18) e Areia Quartzosa Marinha Álica (Amaf).

Figura 43 – Indicação do ponto de coleta do solo residual de granito no mapa geológico

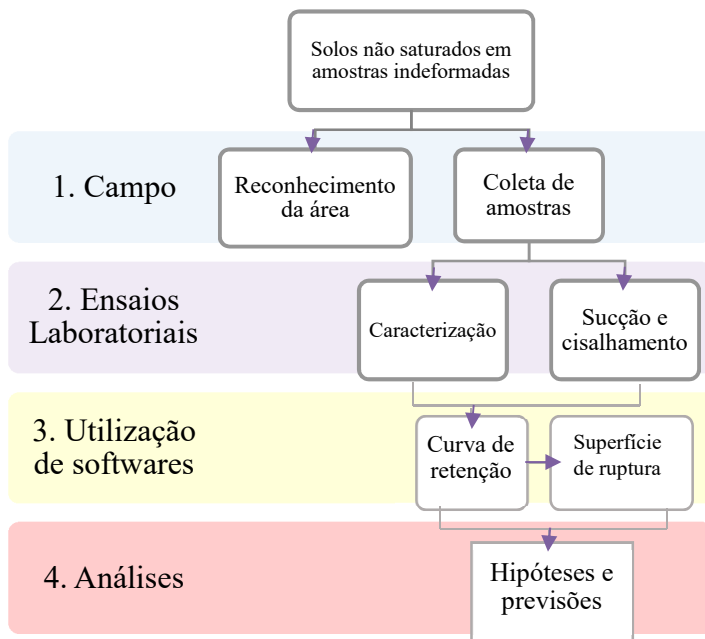


Fonte: Adaptado de Tomazzoli e Pellerim (2015)

4 MATERIAIS E MÉTODO

Com base na revisão bibliográfica, chegou-se a um fluxograma resumido do trabalho. As etapas de trabalho estão apresentadas na Figura 44 e o fluxograma completo pode ser visualizado na Figura 45.

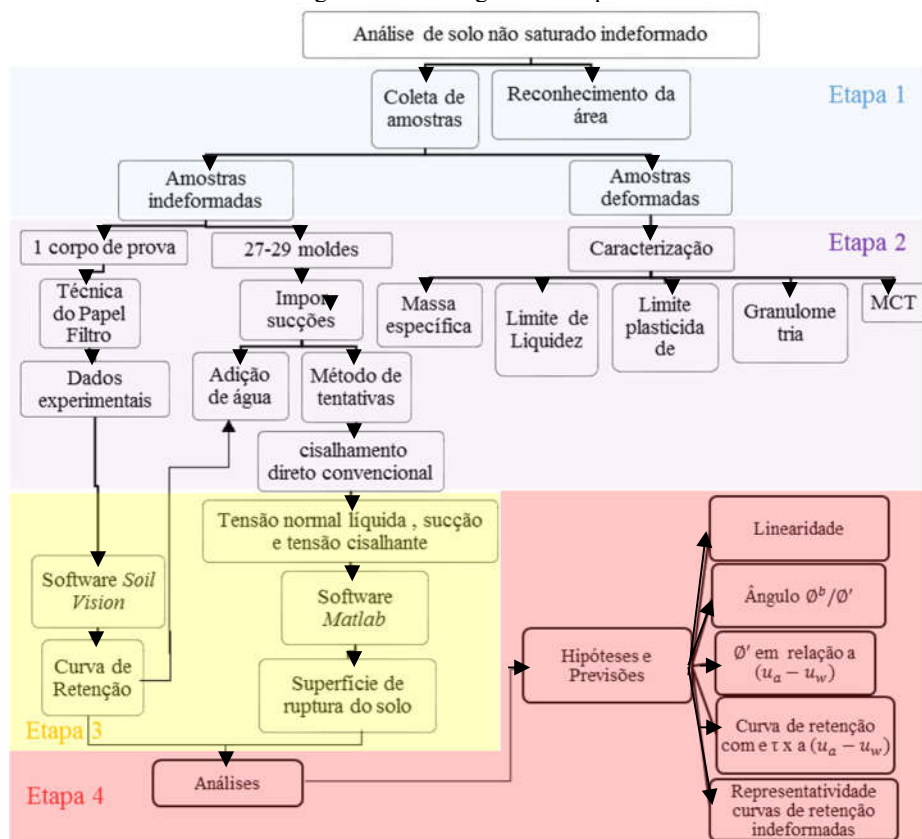
Figura 44 – Fluxograma resumido



Fonte: Autor

Para melhor entendimento a pesquisa foi dividida em 4 etapas, onde a primeira foi ida a campo com o reconhecimento da área, e, assim a coleta de amostras. A segunda etapa foi determinada pelos ensaios realizados em laboratórios. A partir dos dados experimentais, surgiu a terceira etapa, ao qual foi utilizado softwares para auxiliar no melhor entendimento e analisar com mais veracidade os dados experimentais obtidos, sendo possível obter a curva de retenção e a superfície de ruptura do solo. Por último, e com os dados obtidos, a quarta etapa define as hipóteses para análise dos parâmetros encontrados na superfície de ruptura e curva de retenção, discutidos na revisão bibliográfica.

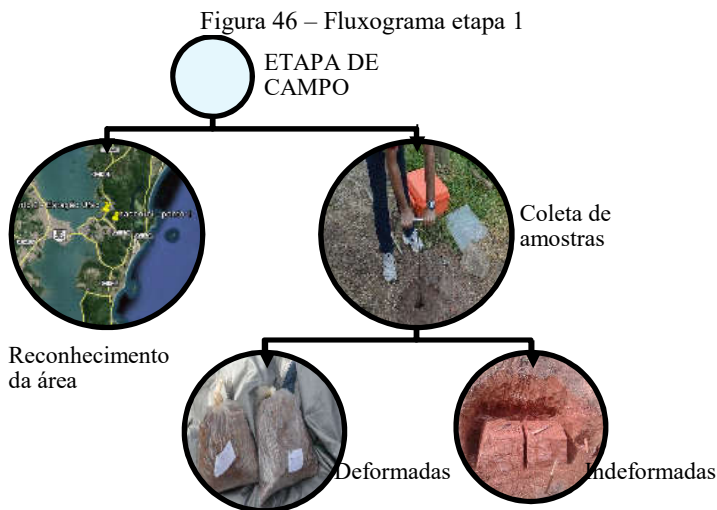
Figura 45 – Fluxograma Completo



Fonte: Autor

4.1 ETAPAS DE CAMPO

A etapa de campo foi dividida entre o reconhecimento da área de estudo e coleta de amostras. A Figura 46 mostra o fluxograma desta etapa.



Fonte: Autor

4.1.1 Reconhecimento da área

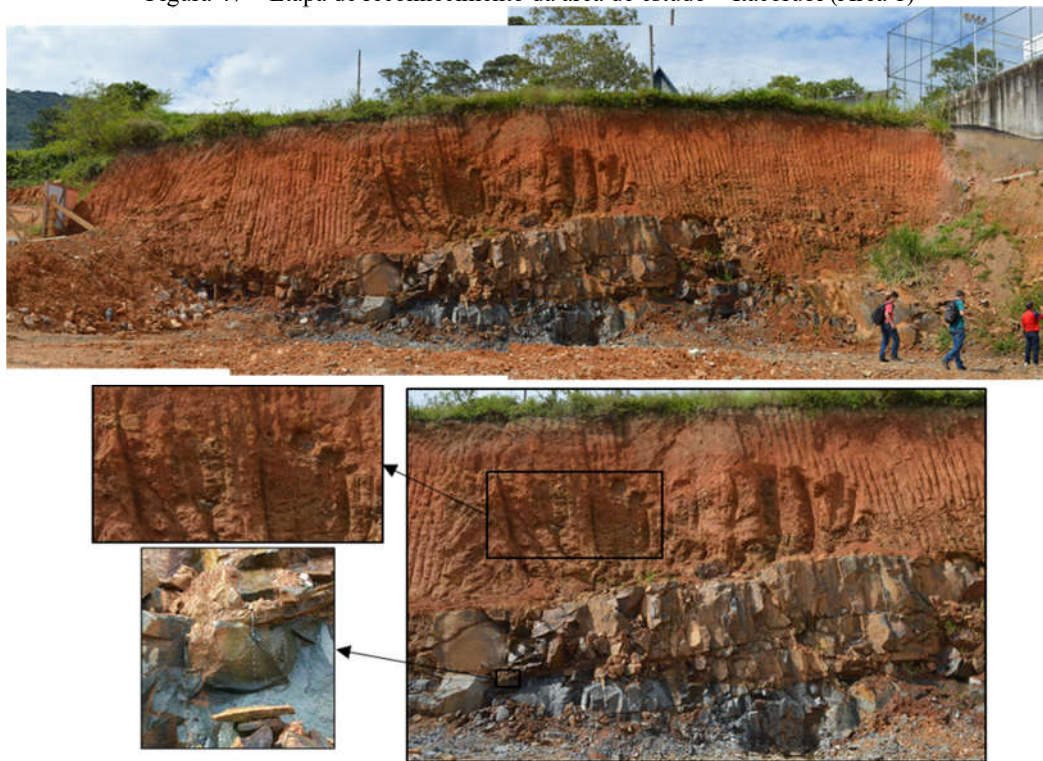
De acordo com o mostrado na caracterização da área de estudo, foram definidos dois pontos com solos tipicamente diferentes para análise. Para o primeiro passo da pesquisa, foi realizada uma visita aos diferentes locais. Nesta etapa de reconhecimento, fez-se uma rápida análise tátil visual e a escolha do ponto de coleta.

A Figura 47 e Figura 48 ilustram o entorno das áreas onde foram realizadas as coletas.

A Figura 47 corresponde a região do Itacorubi, é possível perceber a característica de solo com resíduos da rocha matriz, e também se verifica o dique de diabásio logo abaixo.

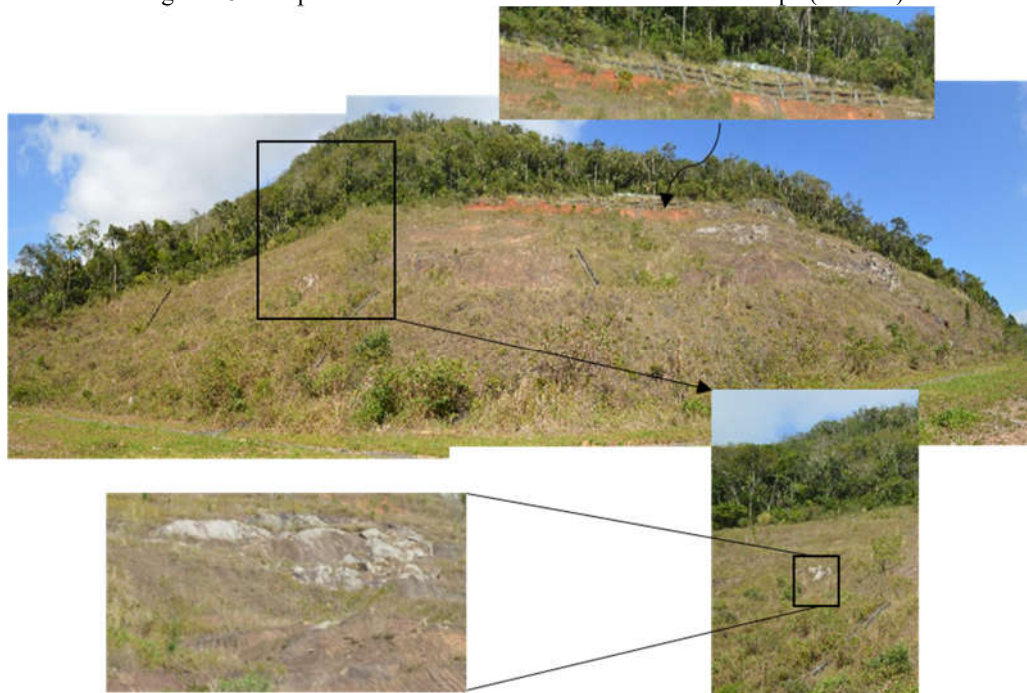
A Figura 48 corresponde à região ao lado da SC-401, onde é possível verificar as contenções, valas de drenagem e há grande presença de matacões, caracterizando um solo com resíduos de rocha granítica.

Figura 47 – Etapa de reconhecimento da área de estudo – Itacorubi (Área 1)



Fonte: Autor

Figura 48 – Etapa de reconhecimento da área de estudo – Cacupé (Ponto 2)



Fonte: Autor

4.1.2 Coleta de amostras

Foram realizadas coletas de amostras deformadas e indeformadas seguindo as técnicas padronizadas e adaptadas para o tipo de material e finalidade a qual o solo se destinou.

Nas figuras 49 e 50 estão indicados os locais de coleta de amostras de solo indeformadas e deformadas de cada local de estudo.

Figura 49 – Coleta de amostra – Itacorubi (Área 1)



Fonte: Autor

Figura 50 – Coleta de amostras – Cacupé (Ponto 2)



Fonte: Autor

As amostras deformadas foram coletadas através da perfuração do solo (com a utilização de trado) até a profundidade de 2,10 metros. Com o avanço do furo, a cada 20 cm ou 30 cm, coletou-se aproximadamente 1,5 kg de solo que foram acondicionados em sacos plásticos. Estas amostras deformadas foram destinadas para os ensaios de caracterização do solo.

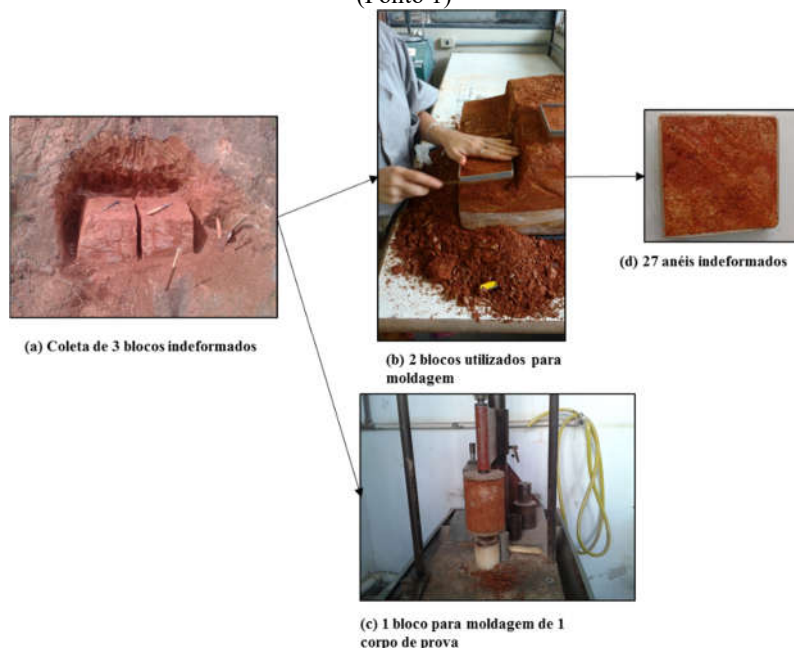
No bairro do Itacorubi (Ponto 1) as amostras indeformadas, foram coletadas em blocos, de dimensões de aproximadamente 30x30x30 cm. Neste local foram retirados 3 blocos na base do talude de corte, localizado a uma profundidade de aproximadamente 5 metros. Já as amostras do bairro de Cacupé (Ponto 2), devido ao difícil acesso, optou-se pela obtenção de amostras indeformadas através da cravação dos moldes do

ensaio de cisalhamento direto no próprio local de estudo e retirada de apenas 1 bloco pequeno. Foram moldados neste local, 29 corpos de prova que apresentam dimensões de 10x10x2cm. Na Figura 50 (c) é possível ver este procedimento de cravação.

As amostras indeformadas coletadas nos dois pontos de estudo foram utilizadas para diferentes finalidades que estão indicadas nas Figura 51 e Figura 52.

Conforme podemos observar (Figura 51), no ponto de coleta na região do Itacorubi, foram coletados três blocos indeformados, um destinado a confecção de um corpo de prova com altura de 10,65cm e diâmetro 10,14cm. Os outros dois blocos indeformados foram destinados para a moldagem de 27 corpos de prova para realização de ensaios de cisalhamento direto.

Figura 51 – Destinação do solo indeformado coletado no bairro Itacorubi (Ponto 1)

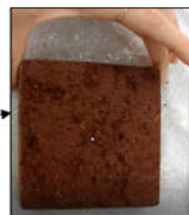


Fonte: Autor

Figura 52 – Destinação do solo indeformado coletado no bairro Cacupé
(Ponto 2)



(a) Coleta de 1 bloco indeformado



(b) 29 moldes indeformados
moldados no campo



(c) 1 bloco para moldagem de um corpo de prova

Fonte: Autor

4.2 ENSAIOS LABORATORIAIS

Após serem realizadas as etapas de campo, a pesquisa se encaminhou para a segunda etapa, onde ocorreram os ensaios laboratoriais e assim, obtenção de dados experimentais. A Figura 53 representa o fluxograma desta etapa.

Figura 53 – Fluxograma etapa 2



Fonte: Autor

O Fluxograma deste capítulo indica de forma simplificada que as amostras deformadas foram utilizadas para a caracterização do solo. O corpo de prova indeformado do solo, foi utilizado para obter a curva de retenção do solo, usando o método do papel filtro. Com os moldes metálicos de solo indeformados, foi descoberto as sucções deles, com a aplicação de um método de imposição indireta de sucção; também utilizando a técnica do papel filtro. A partir do conhecimento dos valores de sucção de cada solo no molde metálico, foram realizados os ensaios de cisalhamento direto convencional.

4.2.1 Caracterização do solo

A Caracterização do solo foi feita em um perfil de 2,10 metros de profundidade escavado a trado. Ao longo da profundidade foram coletadas amostras a cada 20 ou 30 cm de escavação. Foi feita também a caracterização dos solos dos corpos de prova utilizados para obtenção da curva de retenção de água e dos blocos indeformados retirados do bairro do Itacorubi.

A Figura 54 encontra-se a representação esquemática das amostras coletadas no bairro Itacorubi (Ponto 1). Foram realizados 11 ensaios de caracterização para o solo residual de diabásio (Ponto 1 - Itacorubi) e 10 ensaios de caracterização para o solo residual de granito (Ponto 2 - Cacupé).

Figura 54 – Caracterização do solo – Itacorubi

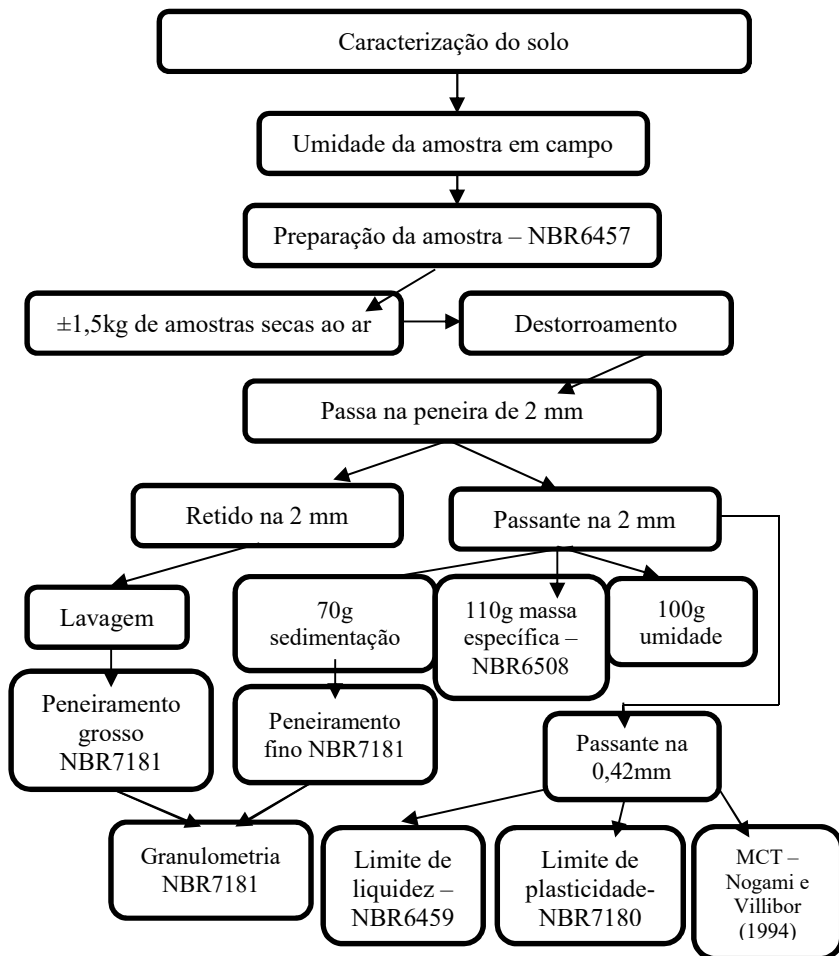


Fonte: Autor

Primeiramente, para iniciar a caracterização do solo, obteve-se a umidade natural de cada amostra obtida em campo.

Após isso, houve a preparação da amostra, seguindo os procedimentos indicados na NBR6457 para a realização dos ensaios de caracterização. A Figura 55 representa o fluxograma completo dos ensaios destinados a cada amostra de solo.

Figura 55 – Caracterização do solo – Fluxograma



Fonte: Autor

Resumidamente, foram realizados ensaios de Limite de Liquidez (WL), Limite de Plasticidade (WP), MCT (Método expedito das pastilhas), massa específica e granulometria do solo. Todos estes ensaios foram realizados nas amostras retiradas dos furos de sondagem executado a trado. Com esses valores, foram obtidos gráficos da caracterização do solo até a profundidade de 2,10 metros. Na Figura 56 são apresentadas algumas imagens da realização dos ensaios de caracterização e índices físicos.

Figura 56 – Imagens dos ensaios de caracterização e índices físicos



Fonte: Adaptado de Bim (2014)

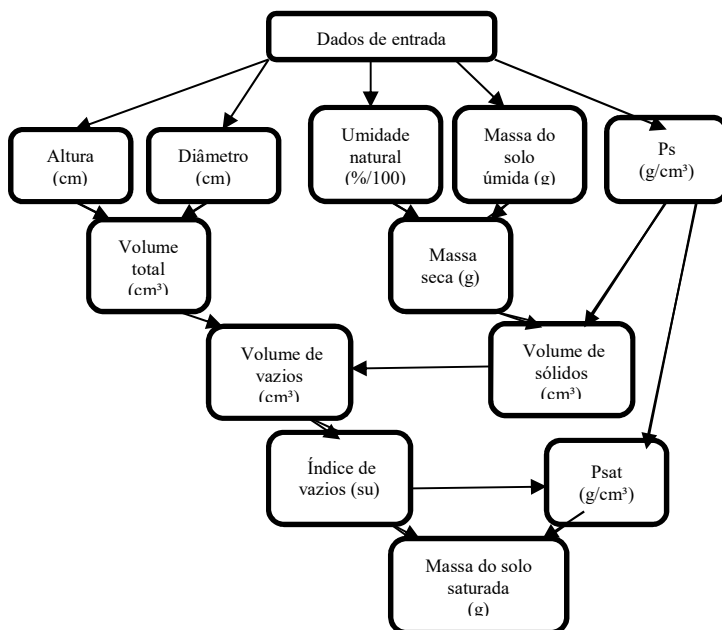
4.2.2 Utilização da Técnica do Papel Filtro

Os corpos de prova cilíndricos de solo indeformado, moldados dos blocos retirados dos dois pontos de estudo, foram utilizados para a determinação das respectivas curvas de retenção de água. Estas curvas foram obtidas com o emprego da técnica do papel filtro.

Considerando que a curva de retenção neste trabalho foi obtida a partir do processo de secagem, houve a necessidade de saturar o corpo de prova. A partir de dados obtidos da caracterização, como a umidade do

solo inicial, massa específica do solo e dimensões do bloco foi possível determinar a quantidade de água que deve ser adicionada aos corpos de prova para que atinjam a saturação (Figura 57).

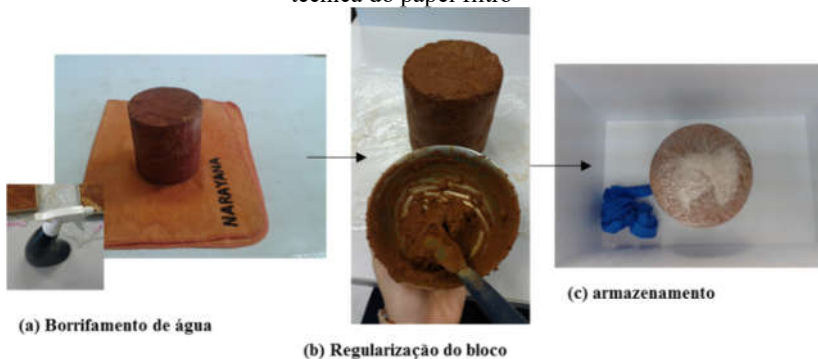
Figura 57 – Fluxograma para cálculo da massa do corpo de prova saturado



Fonte: Autor

Após o cálculo da quantidade de água necessária para saturação do corpo de prova, foi executado o processo da aspersão de água. Após o solo alcançar aproximadamente a quantidade de água saturada, houve a regularização do corpo de prova com o mesmo material de cada solo (cerca de 16g), a fim de se obter uma superfície lisa que permita um bom contato com o papel filtro. A Figura 58 mostra o processo em imagens.

Figura 58 – Regularização da superfície do corpo de prova para utilização da técnica do papel filtro



Fonte: Autor

Após a preparação dos corpos moldados, e por fim saturados, foi possível obter sucções com o processo de secagem, a partir da técnica do papel filtro.

O papel filtro utilizado foi o da marca Whatman n° 42, e o tempo de equilíbrio adotado foi de 7 dias. Para o cálculo da sucção foram utilizadas as Equações de calibração propostas por Chandler et al. (1992), representadas pela equação (11) e (12):

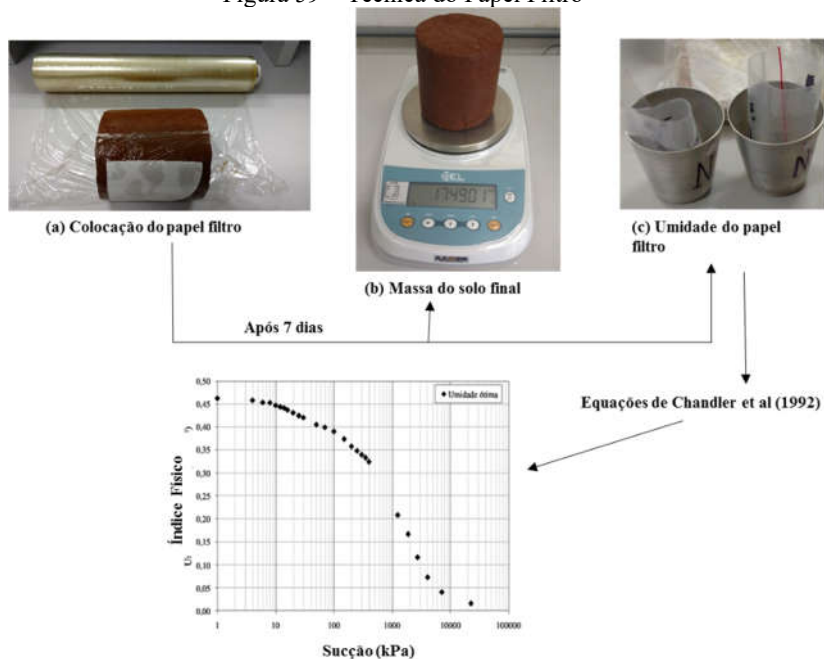
$$\Psi(kPa) = 10^{4,84-0,062w_f} \quad w_f \leq 47\% \quad [P.A^{-2}] \quad (11)$$

$$\Psi(kPa) = 10^{6,05-2,48\log w_f} \quad w_f \geq 47\% \quad [P.A^{-2}] \quad (12)$$

Onde: Ψ =sucção; w_f =umidade do papel filtro encontrada

A Figura 59 representa o processo de colocação do papel filtro. Foram utilizados 2 papéis filtros para cada valor de umidade apresentada pelos corpos de prova durante as etapas de secagem, desse modo foram obtidas 2 sucções por índices físicos (umidade volumétrica), e foi feita a média entre elas. Para a pesagem do papel filtro, utilizou uma balança de quatro casas decimais, e para o corpo de prova foi utilizada uma balança de duas casas decimais.

Figura 59 – Técnica do Papel Filtro



Fonte: Autor

Foram obtidos 16 dados da curva de retenção para o solo residual de diabásio (obtidos em 16 semanas) e 11 dados para o solo residual de granito. Esses dados experimentais, foram utilizados na etapa 3, no processo de obtenção da curva de retenção através de equação de ajuste pelo uso do software *Soil Vision*.

4.2.3 Imposição de sucção nos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto

Como foi argumentado na revisão bibliográfica, para se obter a superfície de ruptura de um solo se faz necessária a realização de ensaios de resistência ao cisalhamento em corpos de prova que apresentam um valor de sucção conhecido. Desse modo, os moldes metálicos com solo indeformados foram utilizados para este fim.

No entanto, como no laboratório onde foi realizada a pesquisa, não possui equipamentos que permitam o controle de sucção, foi utilizado, o equipamento de cisalhamento direto convencional com a determinação de sua sucção inicial do corpo de prova com emprego da técnica do papel filtro.

Através do processo de saturação dos corpos de prova seguida de secagem foi definido que os níveis de sucção dos ensaios seriam de aproximadamente 0, 100, 200, 300 e 500 kPa.

O Primeiro método utilizado, foi a adição de água através da análise da curva de retenção do solo. Ou seja, impor sucções adicionando água até obter o índice físico que correspondia a sucção desejada. Porém, como a faixa de valores de sucção desejadas são próximas (0 a 500kPa) esse método ficou inválido nesta pesquisa, pois as umidades volumétricas eram próximas.

Desse modo, optou-se pelo método de tentativas, que consiste nas seguintes etapas:

- i. Obter a umidade inicial do solo no molde indeformado e massa úmida inicial;
- ii. Borrifar água no solo, até ficar próximo à saturação;
- iii. Colocar Papel Filtro neste molde;
- iv. Após 7 dias verificar a sucção;
- v. Caso o solo indeformado obtenha a sucção desejada ir para o item (vi), caso contrário ir ao item (iii);
- vi. Levar para o ensaio desejado;
- vii. Após ensaio de cisalhamento direto obter a umidade amolgada.

No entanto, considerando que o papel filtro absorve um pouco de água do corpo de prova, este processo pode ser feito ininterruptamente, porém, caso esteja longe da sucção ideal, é necessário colocar a amostra para secar nas condições ambientes e desse modo voltar ao item (iii).

Foi obtida a umidade inicial do corpo de prova no momento da moldagem e a obtenção da umidade amolgada, foi realizada logo após o término do ensaio. Com isso, foi capaz de comparar as perdas de água e analisar a sucção neste método.

Este processo de imposição de sucção, através da técnica do papel filtro, por secagem da amostra, formou uma curva de retenção para cada molde de amostra de solo indeformada, sendo assim relacionada com a curva de retenção obtida no corpo cilíndrico (mostradas na etapa 4).

A Figura 60 mostra o processo realizado para obtenção de succões nos moldes nesta pesquisa.

Figura 60 – Procedimentos utilizados nos ensaios de cisalhamento direto



(a) Moldagem e obtenção de umidade inicial



(b) Aspersão de água nos moldes



(c) Colocação do papel filtro



(d) Armazenados por 7 dias



(f) Retirada do papel filtro



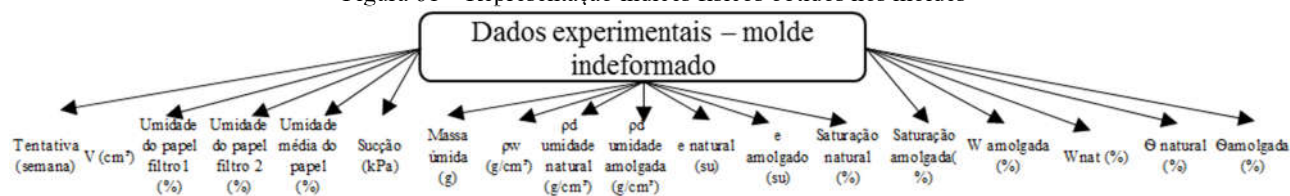
(g) Umidade amolgada após ensaio

Fonte: Autor

Desse modo, a partir dos dados obtidos de cada molde como dimensões, massa, volume, foi possível obter índices físicos relacionados com a umidade natural e umidade amolgada para cada tentativa, conforme é mostrado na Figura 61.

Existem valores de índices físicos com a utilização da umidade natural (umidade esta obtida antes de adicionar água e anterior ao ensaio de cisalhamento) e a umidade amolgada (obtida após ensaio de cisalhamento). Foi utilizado os dados que apresentasse uma melhor representatividade.

Figura 61 – Representação índices físicos obtidos nos moldes



Fonte: Autor

4.2.4 Cisalhamento Direto com sucção

A partir do momento em que a sucção desejada dos corpos de prova é alcançada, segue-se para o ensaio de cisalhamento direto. O procedimento do ensaio de cisalhamento direto realizado nesta pesquisa, foi baseado na norma ASTM D3080-04 com alguns ajustes.

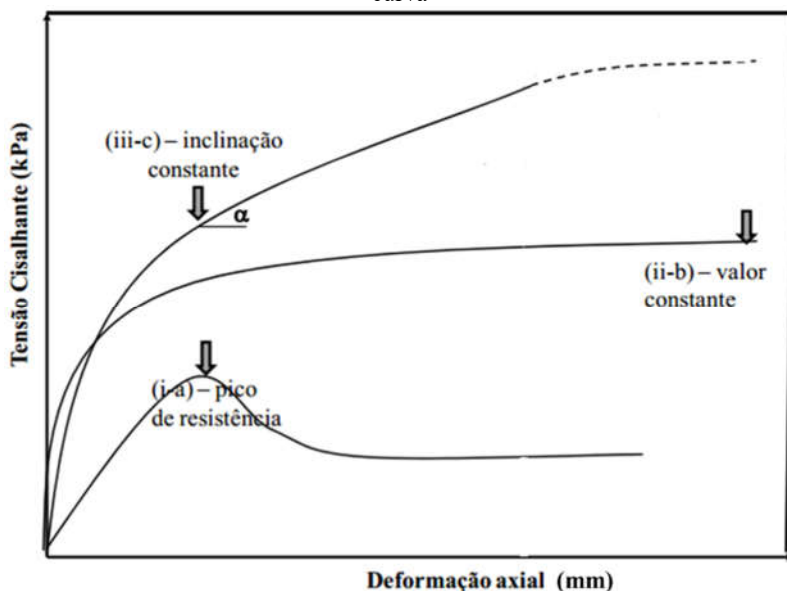
O equipamento utilizado é automatizado por um software, que através da aplicação de tensão normal líquida na amostra, permite a obtenção de dois gráficos: deformação horizontal (mm) *versus* tensão cisalhante (kPa) e deformação horizontal (mm) *versus* deformação vertical (mm).

Devido a não uniformidade dos gráficos obtidos no software, a definição do critério de ruptura seguiu através da análise do comportamento gráfico através do método de Pereira (2013), Feuerharmmel (2007), onde o critério de escolha de tensão cisalhante foi dado por:

- i. Curvas tensão cisalhante versus deformação horizontal que apresentem um pico de resistência bem pronunciado com posterior queda, o pico é considerado o valor de ruptura (a);
- ii. Curvas tensão cisalhante versus deformação horizontal que apresentem uma constância, ou pouca variação, o valor de resistência é o último (b);
- iii. Curvas tensão cisalhante versus deformação horizontal que apresentem uma tensão cisalhante contínua crescente, o valor de resistência é onde a reta mantém a inclinação constante (c).

Os critérios de ruptura e a indicação dos valores de ruptura, são apresentados de forma ilustrativa na Figura 62.

Figura 62 – Indicação dos critérios de ruptura para diferentes formatos de curva



Fonte: Adaptado de Pereira (2013)

A velocidade de cisalhamento considerada foi a 0,307 mm/min, o tempo de cisalhamento foi de uma hora aproximadamente.

Com os dados de sucções, foram obtidos valores de tensão cisalhante e tensões normais aplicadas de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 300 kPa.

Para evitar a perda de água do solo, houve a tentativa de isolar a caixa, onde a amostra foi depositada. E assim, após o ensaio, houve a coleta da amostra para análise de umidade amolgada. A Figura 63, ilustra o processo de montagem do equipamento bem como as etapas de ensaio.

Figura 63 – Preparação e execução do ensaio de cisalhamento direto



(a) Detalhe do equipamento



(b) Isolamento do equipamento



(c) Umidade amolgada após ensaio

Fonte: Adaptado de Bim (2014)

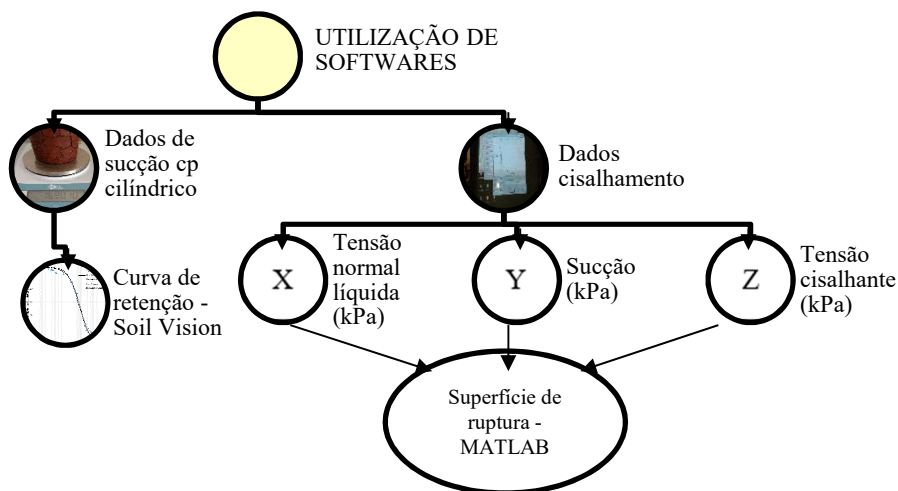
Assim, após cada ensaio de cisalhamento direto obteve-se os valores de resistência ao cisalhamento, tensão normal líquida e um valor de sucção inicial de cada um dos corpos de prova.

4.3 APLICAÇÃO DE *SOFTWARE*

Com os ensaios laboratoriais realizados, e, a obtenção dos valores experimentais, iniciou-se a terceira etapa. Esta etapa consiste em auxiliar no encontro da melhor representação dos dados, para formar uma ferramenta que seja capaz de indicar o comportamento do solo não saturado, como um todo. Assim, este capítulo explica a formação da curva

de retenção e a superfície de ruptura do solo. Para fins de esclarecimento a Figura 64 representa o fluxograma desta etapa.

Figura 64 – Fluxograma etapa 3



Fonte: Autor

4.3.1 Curva de Retenção – *Soil Vision*

Com os pontos obtidos experimentalmente da relação índice físico *versus* sucção do corpo de prova indeformado (seção 4.2.2), foi formada a curva de retenção dos dois solos estudados nesta pesquisa.

Seguindo as instruções das proposições de Oliveira (2015), onde com o uso de *software* a curva de retenção é mais precisa. Decidiu-se utilizar um programa computacional para encontrar a melhor curva que se ajusta aos dados experimentais.

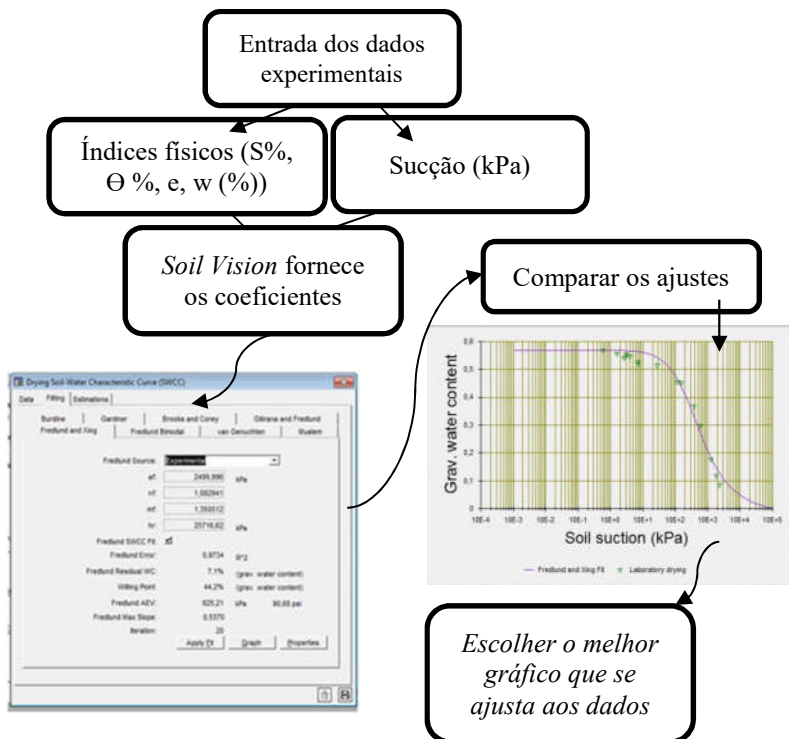
O *software* utilizado foi o *Soil Vision 5.2.01*, cujo os procedimentos realizados para escolha da curva foram:

- i. Entrada dos dados experimentais de índice físico *versus* sucção no aplicativo;
- ii. Obtenção dos valores dos coeficientes das equações que mais se ajustam aos dados (pelo software);
- iii. A partir dos valores dos coeficientes dos ajustes formou-se o gráfico;

- iv. Escolheu a curva que melhor se ajusta aos dados experimentais, através da função com os dados plotados.

A Figura 65, ilustra o processo de obtenção e formação da curva de retenção de água para os dois solos no software.

Figura 65 – Formação da curva de retenção da água – *Soil Vision*



Fonte: Autor

4.3.2 Superfície de ruptura

Por fim, para a representação dos dados de sucção, tensão cisalhante e tensão normal líquida, formou-se uma superfície de ruptura para cada solo estudado. Para a obtenção desta superfície que consiste em um gráfico tridimensional, utilizou o software *MATLAB r2015a*, onde foi capaz de fornecer a melhor função que se adequasse aos dados.

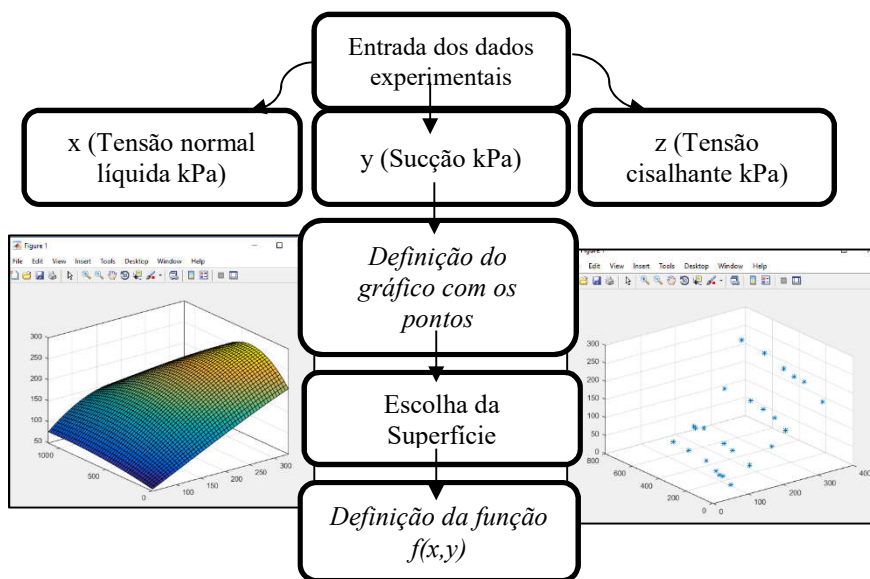
Desse modo, os procedimentos desta pesquisa para obtenção da superfície e função neste software foram:

- i. Entrada dos dados experimentais de tensão normal líquida (eixo x), sucção (eixo y) e tensão cisalhante (eixo z);
- ii. Definição do gráfico com os pontos;
- iii. Escolha da melhor superfície 3D;
- iv. Definição da função da superfície.

A escolha da melhor superfície foi decidida a partir dos pontos (x,y e z) que melhor se enquadraram. O gráfico foi definido no intervalo de 50 a 350 kPa para tensão líquida e 0 a 650 kPa para sucção, devido a quantidade de dados estarem nesta faixa de valores.

Para melhor esclarecimento, a Figura 66 ilustra as etapas de formação da superfície pelo software.

Figura 66 – Formação da superfície de ruptura do solo



Fonte: Autor

4.4 ANÁLISES

Com o estabelecimento da superfície de ruptura e curva de retenção de cada solo, foi possível analisar: os parâmetros de resistência encontrados, a linearidade, a relação da sucção com a tensão cisalhante e

tensão normal entre outras questões definidas nesta etapa, ao qual foi mostrado na revisão de literatura deste estudo.

Esta análise foi feita através da previsão de gráficos mais detalhados retirados da superfície, quanto dos dados da curva de retenção e valores de sucção dos moldes indeformados.

Deste modo, as hipóteses investigadas foram:

- i. Linearidade entre τ versus sucção;
- ii. Relação do ângulo ϕ' com ϕ^b ;
- iii. Variação do ângulo ϕ' com o aumento de sucção;
- iv. Relação entre a curva de retenção e envoltória de resistência;
- v. Representatividade da curva de retenção de solo indeformado;

O item i foi investigado a partir de gráficos τ versus sucção, com tensões aplicadas de 50, 100, 200 e 300 kPa e comparados com as propostas lineares de Fredlund et al. (1978) e não lineares compostas na revisão bibliográfica, além de analisar o comportamento de ϕ^b .

A Relação do ângulo ϕ' com ϕ^b (item ii), foi questionada a partir de gráficos da variação desses ângulos pelas sucções, e verificada a coerência desses valores com a literatura.

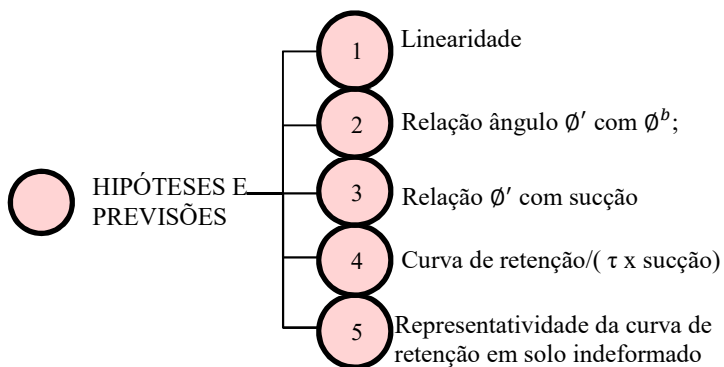
O item iii foi analisado a partir do gráfico τ versus tensão normal líquida, para as sucções de 0, 100, 200, 300 e 500 kPa e relacionados com resultados de estudos recentes.

A relação entre a curva de retenção e envoltória de resistência (item iv) realizou-se através da comparação com o gráfico τ versus sucção utilizando as propostas de Vanapalli (2002).

Por fim, Com os dados de sucção e índices físicos obtidos pelos moldes de cisalhamento, foi possível compará-los com a curva de retenção e assim, verificar a representatividade da curva de retenção de um solo indeformado.

Para melhor entendimento, a Figura 67 representa um resumo das etapas desse processo de previsão de gráficos e análise das hipóteses relacionadas com a pesquisa de solos não saturados.

Figura 67 – Hipóteses e Previsões



Fonte: Autor

5 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios realizados neste trabalho, para o solo residual de diabásio (da região do Itacorubi) e o solo residual de granito (Bairro Cacupê). E por meio desses dados, realiza-se uma análise a fim de responder algumas hipóteses relacionadas ao comportamento do solo.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

De acordo com o que foi esclarecido no método, este item mostra as caracterizações do solo residual de diabásio e solo residual de granito.

A Tabela 7 e Tabela 8 resume os dados obtidos por profundidade de limites de Atterberg, massa específica das partículas e classificação MCT expedito e a umidade natural no dia da coleta, para o solo residual de diabásio e residual de granito respectivamente.

Percebe-se que o solo residual de diabásio possui uma massa específica que varia de $2,59 \text{ g/cm}^3$ nas camadas mais próximas à superfície e chega até o valor de $2,89 \text{ g/cm}^3$ nas mais profundas isso provavelmente está relacionado entre outros fatores, ao lixiviamento de finos da superfície para o horizonte mais profundo além das camadas superficiais possuíram raízes e mais matéria orgânica. O mesmo ocorre para o solo residual de granito que houve a variação de $2,52$ a $2,68 \text{ g/cm}^3$.

No momento que há o aumento da profundidade do solo a umidade vai se estabilizando com faixa de 40% para o solo residual de diabásio e de 30% para o solo residual de granito.

Sobre a condição de plasticidade do solo, é possível perceber que nas camadas iniciais a plasticidade é baixa e ao avançar a profundidade verifica-se que são argilas altamente plásticas para os solos residuais de diabásio. Para o solo residual de granito, percebe-se que a superfície é fracamente plástica, isso ocorre devido à grande quantidade de solo granular, porém o índice de plasticidade nas camadas mais profundas fica em mediantemente plástica, devido ao aumento de argila na composição do solo.

A classificação MCT para ambos os solos resultou em areias com pouca argila laterítica, e, com a profundidade foi modificado para argilas lateríticas e arenosas para ambos os casos. A situação laterítica segundo Oliveira (2015), se confirma pela riqueza de óxido de alumínio e de ferro e isso é perceptível pela coloração vermelha do solo.

Para ilustrar o que foi explicado, a Figura 68 e Figura 69 são gráficos que mostra a caracterização geotécnica do solo ao longo da profundidade.

Tabela 7 - Caracterização do solo com a variação da profundidade (residual de diabásio)

Profundidade	ρ (g/cm ³)	Umidade(%)	W L (%)	W P (%)	IP (%)	MCT
0-30 cm	2,59	16,51	31	28,43	2,49	LA: Areias com pouca argila laterítica
30-50 cm	2,73	12,46	26	17,39	8,65	LA': areias argilosas lateríticas
50-80 cm	2,63	25,68	61,75	36,18	25,58	LA'-LG': Areias argilosas lateríticas argilas lateríticas argilosas
80-100 cm	2,63	31,98	70	47,20	22,87	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
100-120 cm	2,79	33,31	69	48,96	20,04	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
120-150 cm	2,80	31,21	83	46,22	36,29	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
150-170 cm	2,76	30,97	76	46,00	29,67	LA'-LG': Areias argilosas lateríticas e argilas lateríticas argilosas
170-190 cm	2,86	35,29	78	50,23	27,98	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
190-210 cm	2,86	33,95	82	46,04	35,77	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
Bloco de retenção (2,10m)	2,89	40,43	59	41,25	17,89	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
Bloco cisalhamento (2,10m)	2,88	-	69	51,77	17,31	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas

Fonte : O autor

Tabela 8 –Caracterização do solo com a variação da profundidade residual de granito

Profundidade	ρ (g/cm ³)	Umidade(%)	W L (%)	W P (%)	IP (%)	MCT
0-30 cm	2,53	18,05	52	36,67	15,31	LA: Areias com pouca argila laterítica
30-50 cm	2,59	32,23	68	50,22	17,40	LA': areias argilosas lateríticas
50-80 cm	2,63	35,08	93	53,26	39,55	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
80-100 cm	2,63	36,35	80	52,15	27,61	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
100-120 cm	2,62	31,16	70	53,89	16,07	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
120-150 cm	2,63	30,01	81	47,26	33,95	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
150-170 cm	2,65	30,19	70	52,03	17,58	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
170-190 cm	2,65	30,19	69	47,30	21,88	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
190-210 cm	2,70	34,13	78	51,81	26,06	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas
Bloco de retenção	2,67	34,94	92	57,53	34,74	LG': Argilas lateríticas e Argilas lateríticas arenosas

Fonte: O autor

Figura 68- Caracterização do solo com a variação da profundidade Solo Residual de Diabásio

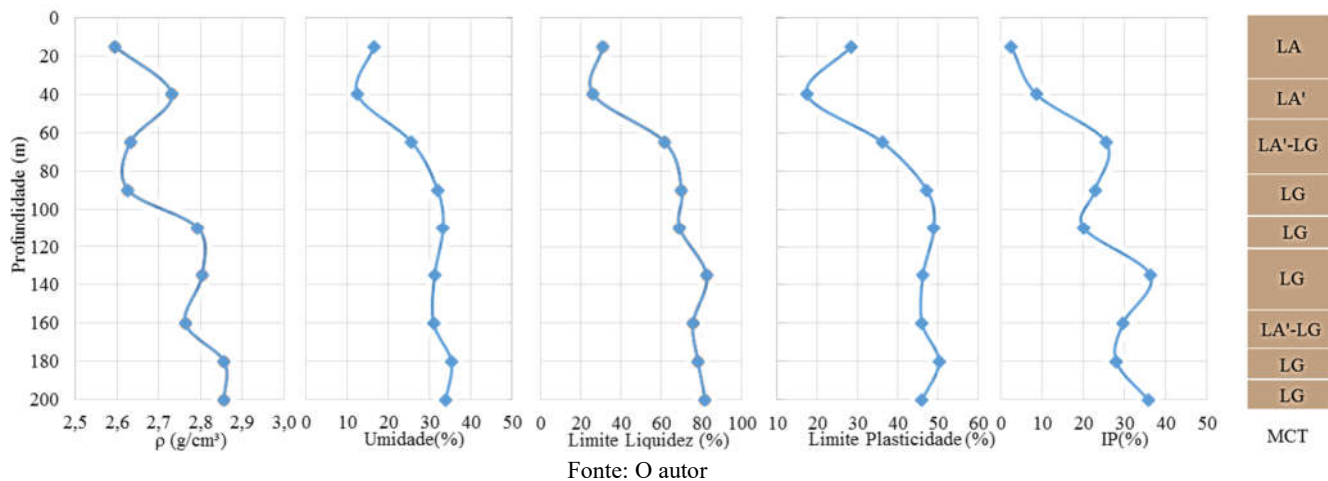
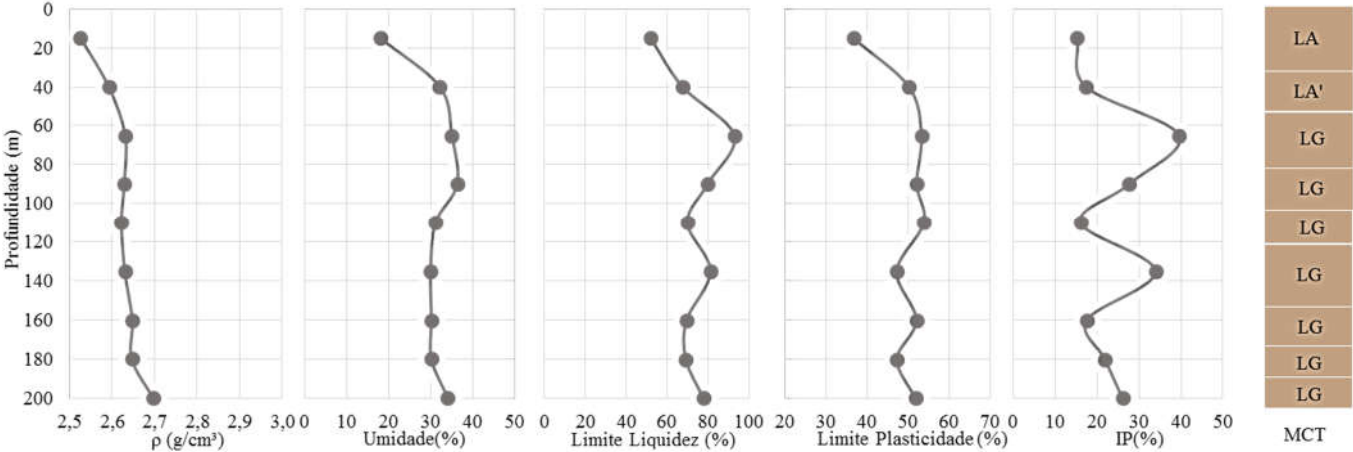


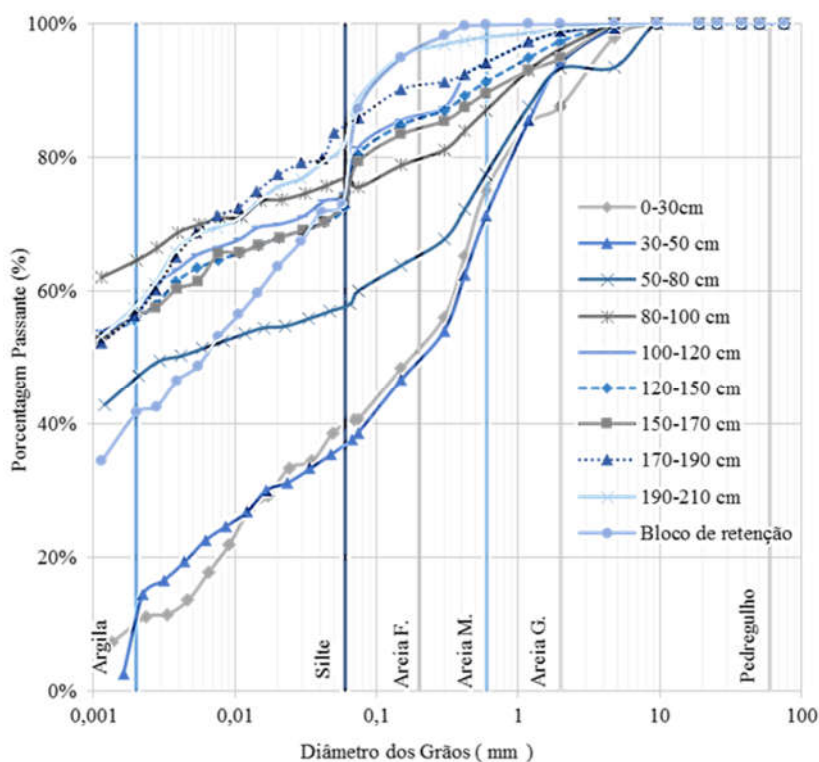
Figura 69 - Caracterização Solo Residual de Granito por profundidade



Fonte: Autor

A Figura 70 apresenta a curva granulométrica para cada profundidade e do bloco de solo utilizado para determinação da curva de retenção de água do solo residual de diabásio. Verifica-se que nas camadas superficiais há maior quantidade de silte, enquanto que nas camadas mais profundas a quantidade de argila é bem significativa. Para melhor entendimento a Tabela 9 resume a leitura da curva granulométrica com a porcentagem de cada solo por profundidade do solo residual de diabásio. Para ilustrar, a Figura 71 representa as frações de solo por profundidade.

Figura 70 – Granulometria do solo Residual de diabásio



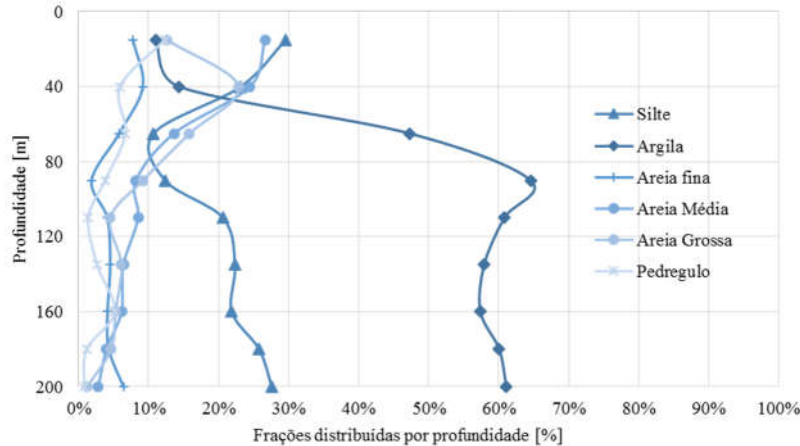
Fonte: Autor

Tabela 9 - Porcentagem de solo por profundidade residual de diabásio

Profundidade	Frações distribuídas de cada solo (%)					
	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
0-30 cm	11,06%	29,62%	7,76%	26,63%	12,61%	12,32%
30-50 cm	14,37%	23,17%	9,18%	24,48%	22,86%	5,93%
50-80 cm	47,33%	10,72%	5,80%	13,63%	15,83%	6,69%
80-100 cm	64,57%	12,36%	1,87%	8,19%	9,20%	3,80%
100-120 cm	60,81%	20,64%	4,10%	8,50%	4,54%	1,41%
120-150 cm	57,93%	22,34%	4,52%	6,42%	6,13%	2,65%
150-170 cm	57,40%	21,88%	4,14%	6,14%	5,29%	5,15%
170-190 cm	60,08%	25,79%	4,32%	4,00%	4,64%	1,16%
190-210 cm	61,11%	27,62%	6,41%	2,81%	1,25%	0,79%
Bloco de retenção	41,66%	45,46%	7,76%	4,89%	0,14%	0,09%

Fonte: O Autor

Figura 71 - Porcentagem de solo por profundidade - Residual de diabásio



No entanto, das curvas granulométricas obtidas para o solo residual de granito (Figura 72), observa-se uma maior quantidade de areia grossa nas camadas superficiais e nas camadas mais profundas a quantidade de argila e silte é bem significativa. Para melhor entendimento, a Tabela 10 resume a leitura da curva granulométrica com a porcentagem de cada solo

por profundidade. Para ilustrar a Figura 73 representa a quantidade de tipo de solo por profundidade.

Figura 72 - Granulometria Solo Residual de granito

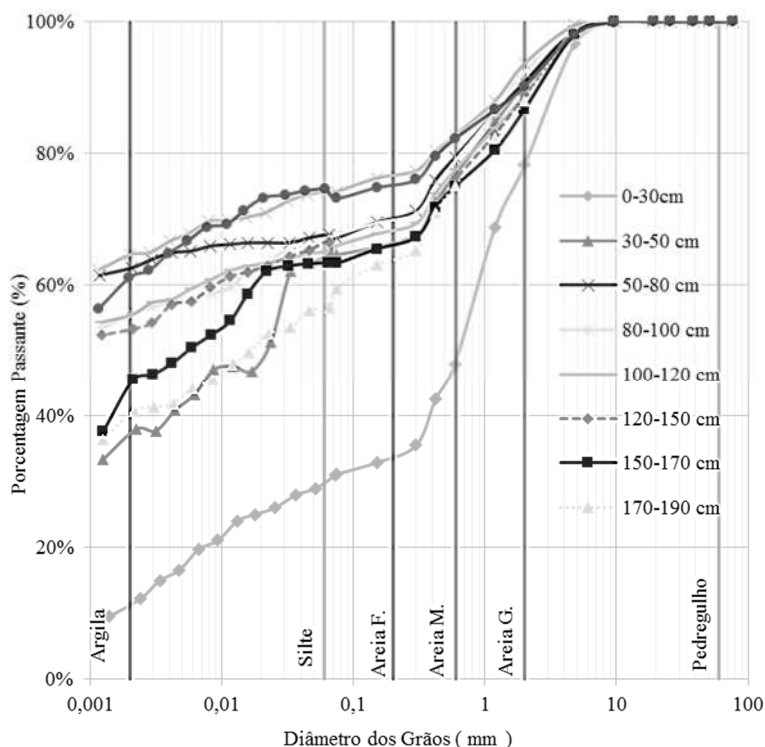
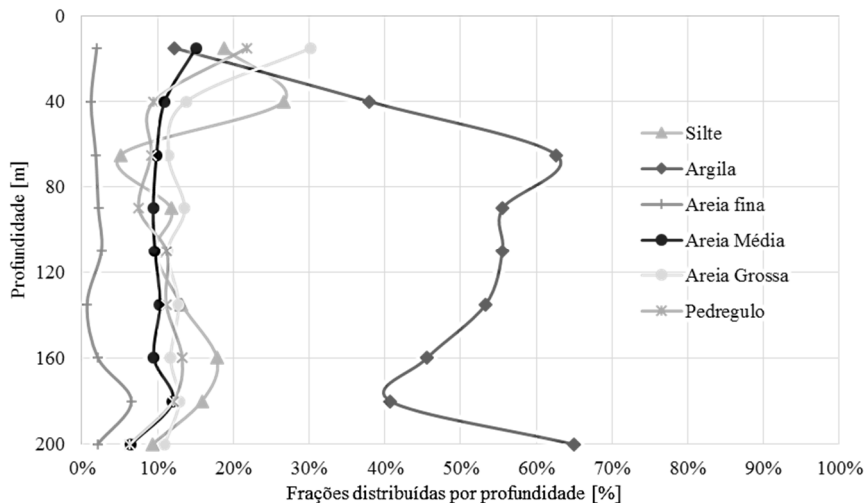


Tabela 10 – Porcentagem de solo por profundidade residual de granito

Profundidade	Frações distribuídas de cada solo (%)					
	Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
0-30 cm	12,23%	18,74%	1,95%	15,07%	30,25%	21,77%
30-50 cm	37,97%	26,61%	1,22%	10,95%	13,76%	9,50%
50-80 cm	62,66%	5,07%	1,84%	9,87%	11,43%	9,14%
80-100 cm	55,54%	11,76%	2,17%	9,41%	13,58%	7,53%
100-120 cm	55,54%	9,69%	2,59%	9,65%	11,36%	11,18%
120-150 cm	53,33%	13,16%	0,68%	10,29%	12,76%	11,14%
150-170 cm	45,55%	17,83%	2,13%	9,52%	11,72%	13,25%
170-190 cm	40,76%	15,84%	6,53%	12,00%	12,84%	12,04%
190-210 cm	64,95%	9,29%	2,05%	6,48%	10,91%	6,32%

Bloco de retenção	62,22%	12,36%	0,25%	7,40%	7,99%	9,79%
----------------------	--------	--------	-------	-------	-------	-------

Figura 73 – Porcentagem de solo por profundidade – residual de granito



Fonte: Autor

5.2 DADOS EXPERIMENTAIS PAPEL FILTRO – CORPO DE PROVA

As representações gráficas dos pontos experimentais das medidas de sucção, para os solos residuais de diabásio e granito, aos quais foram obtidos a partir do método do papel filtro no corpo de prova cilíndrico, estão ilustradas nas Figura 74 e Figura 75, os dados estão detalhados na Tabela 11 e Tabela 12.

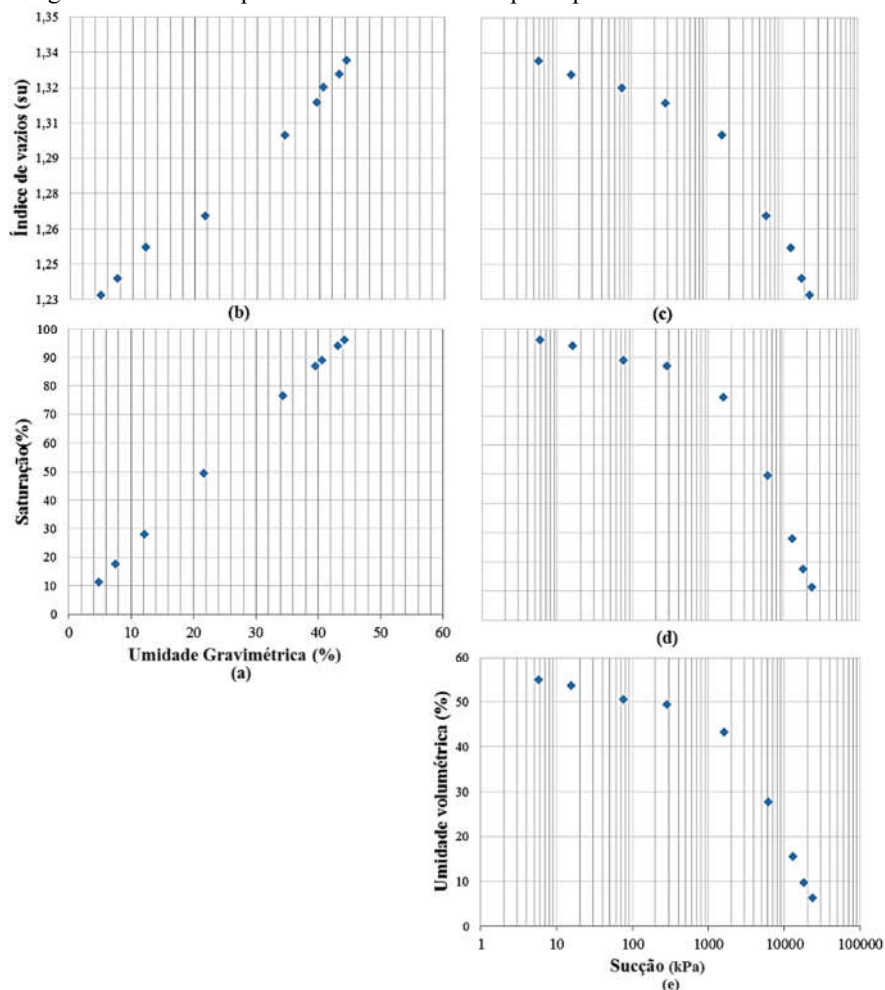
Na Figura 74, solo residual de diabásio, percebe-se que há uma redução do índice de vazios na medida em que diminui a umidade gravimétrica, isso ocorre devido ao aumento da sucção que atua como um confinamento interno aumentando a força de atração entre as partículas do solo. Esta mesma relação é perceptível nos solos residuais de granito (Figura 75), porém ocorrem reduções no índice de vazios até valores de sucção na ordem de 1000 kPa. A partir deste valor, o aumento da sucção já não consegue reduzir o índice de vazios.

Com relação aos dados obtidos para a curva de retenção (umidade volumétrica e saturação *versus* sucção), considerando ser um solo indeformado, tanto para o solo residual de diabásio quanto para o granito

granito os dados se ajustaram bem (na forma logarítmica), sendo possível a utilização de equações de ajustes.

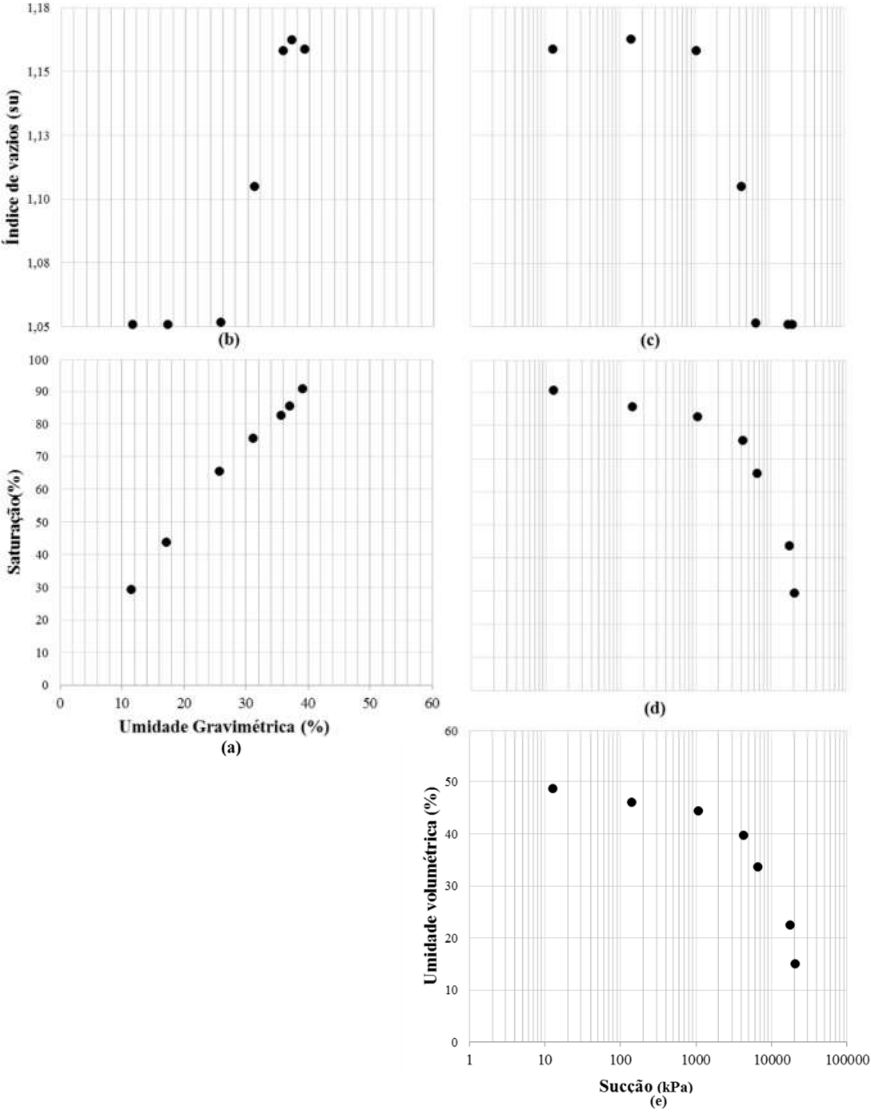
É possível perceber, nos dois solos residuais, que há a redução de volume com o aumento de sucção e secagem do bloco. Isto ocorre devido à perda de umidade; o solo passa por um processo de contração devido à atuação da capilaridade por meio da membrana contráctil que se forma em sua superfície.

Figura 74 - Dados experimentais obtidos do corpo de prova - residual de diabásio



Fonte: O autor

Figura 75 - Dados experimentais obtidos do corpo de prova residual de granito



Fonte: O autor

Tabela 11 – Dados de experimentais e índices físicos do bloco para obtenção da curva de retenção – Residual de diabásio

Data retirada	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média	Sucção (kPa)	V (cm ³)	ρ_w (g/cm ³)	pd(g/cm ³)	e (su)	Mw (g)	Saturação (%)	W (%)	Θ (%)
17/ago	1,35	1,34	135,32	5,81	857,60	1,78	1,23	1,33	470,5	96,05	0,44	54,86
24/ago	0,90	0,91	90,74	15,65	855,41	1,77	1,24	1,32	458,5	94,03	0,43	53,60
28/set	0,48	0,47	48,23	75,05	853,38	1,75	1,24	1,32	431,9	88,93	0,40	50,60
12/out	0,38	0,38	38,49	283,90	851,03	1,74	1,24	1,31	420,2	86,96	0,39	49,37
29/out	0,26	0,26	26,41	1592,73	845,96	1,68	1,25	1,29	365,3	76,40	0,34	43,18
13/nov	0,16	0,17	16,95	6146,20	833,34	1,55	1,27	1,26	230,3	49,47	0,21	27,63
23/nov	0,11	0,11	11,72	12975,05	828,40	1,43	1,28	1,25	129,3	28,06	0,12	15,60
07/dez	0,09	0,09	9,35	18199,31	823,58	1,38	1,29	1,23	80,14	17,58	0,075	9,73
06/jan	0,07	0,073	7,61	23327,65	820,90	1,35	1,29	1,23	51,62	11,39	0,048	6,28

Fonte: O autor

Tabela 12 – Dados experimentais e índices físicos do bloco para obtenção da curva de retenção – Residual de granito

Data retirada	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média	Sucção (kPa)	V (cm ³)	ρ_w (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e (su)	Mw (g)	Saturação (%)	W (%)	Θ (%)
19/out	0,99	0,98	98,91	12,63	1035,81	1,73	1,24	1,15	504,70	90,778	39,15%	48,725
09/nov	0,42	0,43	43,37	97,62	1037,65	1,70	1,24	1,16	477,68	85,637	37,05%	46,0347
16/nov	0,29	0,28	29,25	259,24	1035,54	1,68	1,24	1,15	459,75	82,735	35,66%	44,3971
23/nov	0,19	0,19	19,59	700,49	1010,04	1,67	1,27	1,10	400,81	75,593	31,09%	39,6822
07/dez	0,16	0,16	16,45	1080,44	984,42	1,64	1,30	1,05	331,42	65,677	25,71%	33,6662
17/dez	0,096	0,093	9,51	4205,17	984,05	1,53	1,31	1,05	220,77	43,784	17,12%	22,4348
06/jan	0,089	0,081	8,57	5442,12	984,05	1,46	1,31	1,05	148,13	29,375	11,49%	15,0531

Fonte: O autor

5.3 DADOS DE IMPOSIÇÃO DE SUCÇÃO NOS MOLDES

Os valores de sucções obtidos nas amostras para cisalhamento, com a técnica do papel filtro estão dispostos resumidamente na Tabela 13 e Tabela 14, e, detalhados no Apêndice A e B, para solo residual de diabásio e solo residual de granito.

É possível perceber que existem valores de índices físicos com a utilização da umidade natural (umidade esta obtida antes de adicionar água e anterior ao ensaio de cisalhamento) e a umidade amolgada (obtida após ensaio de cisalhamento). Os dados que apresentaram melhor representatividade foram com relação à umidade amolgada, por ser os valores mais próximos da condição do solo, pois o solo na umidade natural apresentou bastante variação. Esta variação pode ter ocorrido devido à armazenagem do solo, assim, os valores de umidade amolgada foram os utilizados para o ensaio de cisalhamento.

A massa específica das partículas para os cálculos dos índices físicos foram de 2,89 e 2,59 (g/cm³) para residual de diabásio e residual de granito respectivamente, e, massa específica da água de 1 g/cm³.

O tempo, em semanas, para se obter a sucção desejada para o solo residual de diabásio variou entre 1 a 15 semanas, dependendo da sucção necessária. Para o solo residual de granito o tempo foi de 1 a 14 semanas. Porém é possível perceber que os valores de sucção foram obtidos mais rápido nos moldes de solos residuais de granito, em até 5 semanas (60% dos moldes) em relação aos moldes de residual de diabásio. Isto é explicado devido ao solo possuir mais grãos em sua estrutura, pois, de uma maneira geral, tendem a apresentar perda brusca de umidade, associadas aos macroporos, quando a sucção ultrapassa a sucção de entrada de ar.

Em contrapartida, o solo residual de diabásio levou um tempo de 11 semanas (60 % dos moldes) e é explicado pela grande quantidade de solos finos que tendem a reter mais água.

Por ser um método bastante empírico deve-se tomar bastante cautela para se utilizar em ensaios com controle de sucção específicos. Para o que o trabalho propõe este método se aplicou bem.

Tabela 13 – Dados de sucção e índices físicos dos moldes para cisalhamento – Residual de diabásio

Nº	Tentativas (semanas)	Sucção do corpo(kPa)	Volume (cm³)	Massa do solo úmida(g)	Umidade natural(%)	Massa seca natural(g)	Umidade amolgada(%)	Massa seca amolgada	Umidade volumétrica amol(g/%)	Umidade volumétrica natural(%)	pw (g/cm³)	pd n(g/cm³)	pd a (g/cm³)	Sn (%)	Sa (%)	c n(su)	e a (su)
1	0	0,00	197,41	340,41	41,68	241,96	48,70	228,93	56,47	49,87	1,72	1,22	1,16	87,61	94,29	1,38	1,49
2	0	0,00	200,06	337,90	39,19	242,76	52,34	221,80	58,03	47,56	1,69	1,21	1,11	81,95	94,13	1,38	1,61
3	0	0,00	204,07	358,54	49,16	242,23	50,46	238,30	58,92	56,99	1,76	1,18	1,17	97,71	98,85	1,45	1,48
4	1	115,07	204,75	350,23	42,61	246,29	40,26	249,70	49,10	50,76	1,71	1,20	1,22	87,34	84,92	1,41	1,37
5	1	89,39	204,07	357,50	42,61	252,09	39,44	256,38	49,55	51,65	1,75	1,23	1,26	91,01	87,63	1,35	1,30
6	1	62,37	207,04	348,70	42,61	245,92	39,30	250,32	47,52	49,64	1,68	1,18	1,21	85,07	81,68	1,45	1,39
7	11	207,58	200,06	337,64	39,47	244,77	36,97	246,51	45,55	46,42	1,69	1,21	1,23	82,15	79,38	1,39	1,35
8	9	186,62	200,33	332,53	32,03	244,96	37,81	241,30	45,54	43,71	1,66	1,26	1,20	71,25	78,07	1,30	1,40
9	11	339,96	198,17	316,39	31,24	237,11	36,00	232,63	42,26	40,00	1,60	1,22	1,17	65,61	71,16	1,38	1,46
10	3	126,69	198,46	344,25	38,48	243,24	41,50	243,29	50,87	50,90	1,73	1,25	1,23	85,06	88,33	1,31	1,36
11	0	0,00	197,68	334,60	37,92	235,06	x	x	x	50,35	1,69	1,23	x	80,87	x	1,36	x
12	13	406,85	189,67	278,53	39,67	207,44	34,06	207,77	37,31	37,48	1,47	1,05	1,10	65,54	60,07	1,75	1,64
13	11	206,60	197,31	321,32	42,39	233,88	37,83	233,13	44,70	44,32	1,63	1,14	1,18	80,21	75,59	1,53	1,45
14	14	2560,63	203,24	311,43	40,85	232,15	34,40	231,71	39,22	39,01	1,53	1,09	1,14	71,26	64,76	1,66	1,54
15	11	317,58	197,41	311,06	41,61	228,92	35,89	228,91	41,61	41,61	1,58	1,11	1,16	75,27	69,48	1,60	1,49
16	13	433,24	212,59	321,39	38,38	238,03	33,86	240,09	38,24	39,21	1,51	1,09	1,13	67,40	62,76	1,65	1,56
17	6	95,77	201,53	327,09	42,24	232,21	40,51	232,78	46,80	47,08	1,62	1,14	1,16	79,63	77,94	1,53	1,50
18	13	639,03	198,39	291,39	39,72	218,67	34,63	216,43	37,78	36,65	1,47	1,05	1,09	65,61	60,68	1,75	1,65
19	15	415,86	208,71	301,40	40,29	225,48	33,63	225,54	36,35	36,38	1,44	1,03	1,08	64,41	58,04	1,81	1,68
20	15	501,90	210,01	301,50	41,99	223,44	35,50	222,51	37,61	37,17	1,44	1,01	1,06	65,29	59,37	1,86	1,73
21	2	131,29	201,44	299,03	41,54	213,74	38,97	215,17	41,63	42,34	1,48	1,05	1,07	68,37	66,02	1,76	1,71
22	2	13,22	203,22	321,50	40,80	224,95	x	x	x	47,51	1,58	1,12	x	74,98	x	1,57	x
23	15	460,01	210,50	304,61	40,43	230,33	33,53	228,13	36,33	35,29	1,45	1,03	1,08	64,74	58,12	1,81	1,67
24	0	0,00	209,00	351,60	42,79	240,76	x	x	x	53,04	1,68	1,18	x	85,09	x	1,45	x
25	12	318,30	211,98	331,01	41,56	241,28	37,32	241,06	42,44	42,33	1,56	1,10	1,14	74,13	69,95	1,62	1,54
26	12	277,17	206,49	337,01	41,76	245,28	38,39	243,53	45,27	44,42	1,63	1,15	1,18	79,90	76,47	1,51	1,45
27	9	192,47	205,95	336,95	41,51	242,41	39,37	241,76	46,22	45,91	1,64	1,16	1,17	79,98	77,82	1,50	1,46

Fonte : O autor

Tabela 14 – Dados de sucção e índices físicos dos moldes de cisalhamento –Residual de granito

Nº	Tentativas (semanas)	Sucção (kPa)	Massa do solo úmida(g)	Volume (cm³)	Umidade natural (%)	Massa seca natural	Umidade amolgada(%))	Massa seca amolgada	Umidade volumétrica amolg(%)	Umidade volumétrica natural (%)	ρw (g/cm³)	ρd n(g/cm³)	ρd a (g/cm³)	Sn (%)	Sa (%)	e n(su)	e a (su)
1	14	748,66	342,49	207,18	33,08	264,53	29,40	264,68	37,56	37,63	1,65	1,28	1,28	74,16	74,06	1,03	1,03
2	0	0,00	358,22	208,47	15,16	311,08	x	x	x	22,61	1,72	1,49	x	53,30	x	0,74	x
3	3	46,54	384,42	203,24	37,05	280,07	36,67	281,27	50,75	51,34	1,89	1,38	1,38	109,63	108,89	0,88	0,87
4	0	0,00	380,53	206,47	21,07	314,30	x	x	x	32,08	1,84	1,52	x	77,72	x	0,70	x
5	8	191,05	361,90	204,07	35,88	269,58	37,20	263,78	48,08	45,24	1,77	1,32	1,29	92,26	95,91	0,96	1,01
6	11	613,95	275,37	192,68	36,74	212,82	36,23	202,14	38,01	32,46	1,43	1,10	1,05	56,57	63,85	1,35	1,47
7	x	x	356,73	231,45	36,08	262,14	x	x	x	40,87	1,54	1,13	x	72,58	x	1,29	x
8	0	0,00	347,15	204,75	37,12	245,53	x	x	x	49,63	1,70	1,20	x	92,36	x	1,16	x
9	x	x	298,79	205,36	33,60	223,64	x	x	x	36,59	1,45	1,09	x	63,11	x	1,38	x
10	0	5,19	350,70	206,08	38,15	249,22	40,88	248,93	49,38	49,24	1,70	1,21	1,21	92,31	92,48	1,14	1,15
11	x	x	355,09	207,04	21,96	291,15	x	x	x	30,88	1,72	1,41	x	67,51	x	0,84	x
12	0	0,00	387,16	205,88	36,65	277,57	x	x	x	53,23	1,88	1,35	x	110,93	x	0,92	x
13	4	219,09	318,26	199,10	33,00	238,27	33,98	237,54	40,54	40,18	1,60	1,20	1,19	74,64	75,12	1,17	1,17
14	10	0,00	345,41	203,24	32,75	260,21	42,17	242,96	50,41	41,92	1,70	1,28	1,20	82,84	93,56	1,02	1,17
15	7	195,01	309,79	205,27	34,47	229,69	35,33	228,91	39,40	39,02	1,51	1,12	1,12	68,67	69,15	1,32	1,32
16	4	212,51	372,88	231,45	32,49	280,60	34,26	277,72	41,11	39,87	1,61	1,21	1,20	74,91	76,55	1,14	1,16
17	8	560,46	368,36	205,88	30,84	282,47	33,41	276,12	44,80	41,72	1,79	1,37	1,34	88,63	92,84	0,89	0,93
18	10	1119,71	283,50	201,44	33,79	216,80	31,43	215,70	33,66	33,11	1,41	1,08	1,07	56,62	57,35	1,41	1,42
19	5	175,51	265,54	186,65	33,08	197,98	36,45	194,61	38,00	36,20	1,42	1,06	1,04	61,27	63,58	1,44	1,49
20	3	87,75	332,15	209,00	34,93	246,12	36,03	244,17	42,10	41,16	1,59	1,18	1,17	75,44	76,64	1,20	1,22
21	2	109,14	318,58	205,12	32,62	239,40	35,23	235,59	40,46	38,60	1,55	1,17	1,15	70,22	72,65	1,22	1,26
22	5	471,32	305,87	207,04	28,69	243,51	34,69	227,09	38,05	30,12	1,48	1,18	1,10	55,14	65,96	1,20	1,36
23	2	115,25	297,26	204,75	34,11	220,83	36,24	218,19	38,62	37,33	1,45	1,08	1,07	63,93	65,58	1,40	1,43
24	3	324,25	331,07	211,31	32,73	250,55	31,79	251,20	37,80	38,10	1,57	1,19	1,19	70,23	69,82	1,19	1,18
25	3	80,71	336,74	206,08	21,34	277,32	17,86	285,70	24,77	28,83	1,63	1,35	1,39	59,96	53,24	0,93	0,87
26	3	305,12	363,23	194,77	31,19	277,23	30,37	278,62	43,44	44,16	1,86	1,42	1,43	97,94	96,94	0,82	0,81
27	3	297,82	277,53	197,68	34,06	207,19	35,79	204,38	37,00	35,58	1,40	1,05	1,03	59,74	61,56	1,47	1,51
28	3	503,71	338,69	205,36	33,36	254,48	33,42	253,85	41,31	41,01	1,65	1,24	1,24	78,57	78,97	1,09	1,10
29	3	350,24	348,99	206,47	30,78	266,87	29,84	268,78	38,85	39,77	1,69	1,29	1,30	79,33	78,04	1,01	0,99

Fonte : O autor

5.4 DADOS DE RESISTÊNCIA COM SUÇÃO

Devido à perda, apenas 26 dos 27 moldes de solo residual de diabásio foram levados ao cisalhamento. O mesmo aconteceu com os moldes de solo residual de granito: dos 29 apenas 27 foram utilizados.

As Figura 76 à Figura 79 representam gráficos de tensão cisalhante versus deformação normal e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal com a aplicação de tensões normais de 50, 100, 200 e 300 kPa, para o solo residual de diabásio.

Para maiores detalhes, nos apêndices B e C estão os valores de sucção encontrados pelo papel filtro, junto com a análise de ruptura do solo encontrados pelo ensaio de cisalhamento direto e seus índices físicos.

Da Figura 80 a Figura 83 representam gráficos de tensão cisalhante versus deformação normal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal com a aplicação de tensões normais de 50, 100, 200 e 300 kPa, para o solo residual de granito.

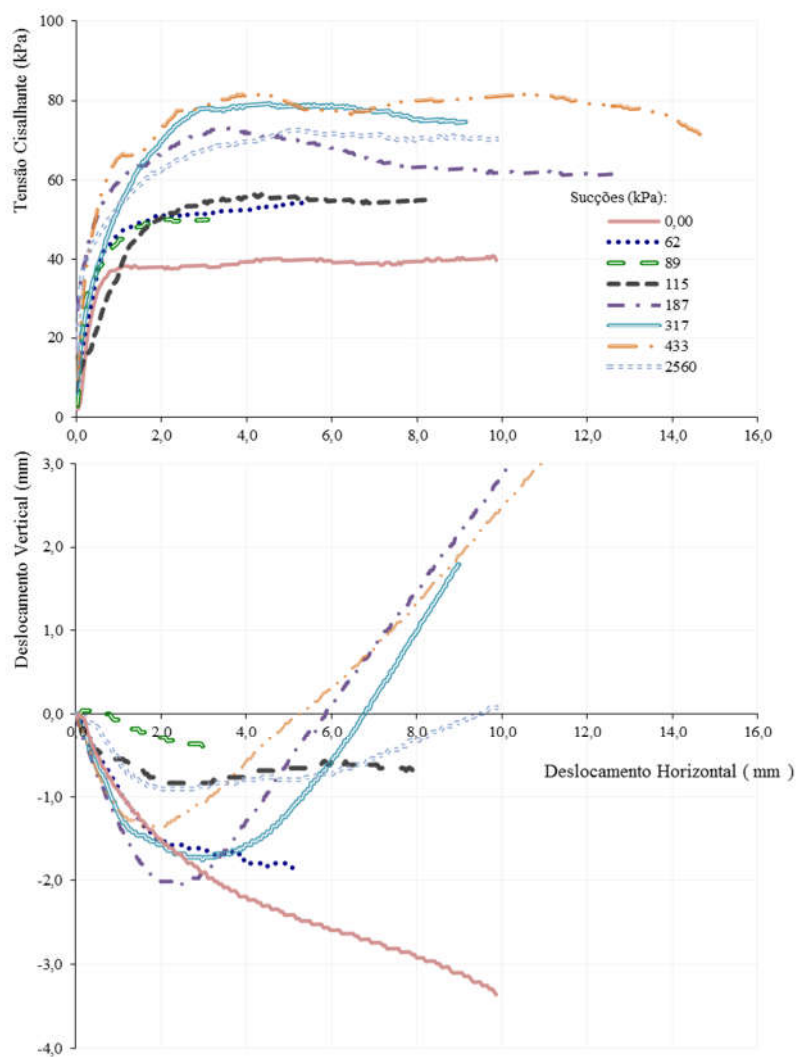
Lembrando que o estágio 1, 2, 3 e 4 correspondem a 50, 100, 200 e 300 kPa aplicados de tensão normal líquida (kPa) no molde durante o ensaio de cisalhamento.

É notável que sucções muito próximas, devido a simplicidade do ensaio, obtidas pelo papel filtro, tendem a ter o mesmo comportamento como pode ser visto nas sucções de 62, 89 e 115,07 kPa no primeiro estágio para o solo residual de diabásio (Figura 76) e nas sucções de 115, 195 e 219 kPa para o solo residual de granito, no terceiro estágio (Figura 82).

Percebe-se que a maioria dos resultados obteve uma similaridade com a aceitação de que há o incremento de resistência com o aumento da sucção somente o estágio 4 do solo residual de granito houve uma não concordância com os valores de sucção.

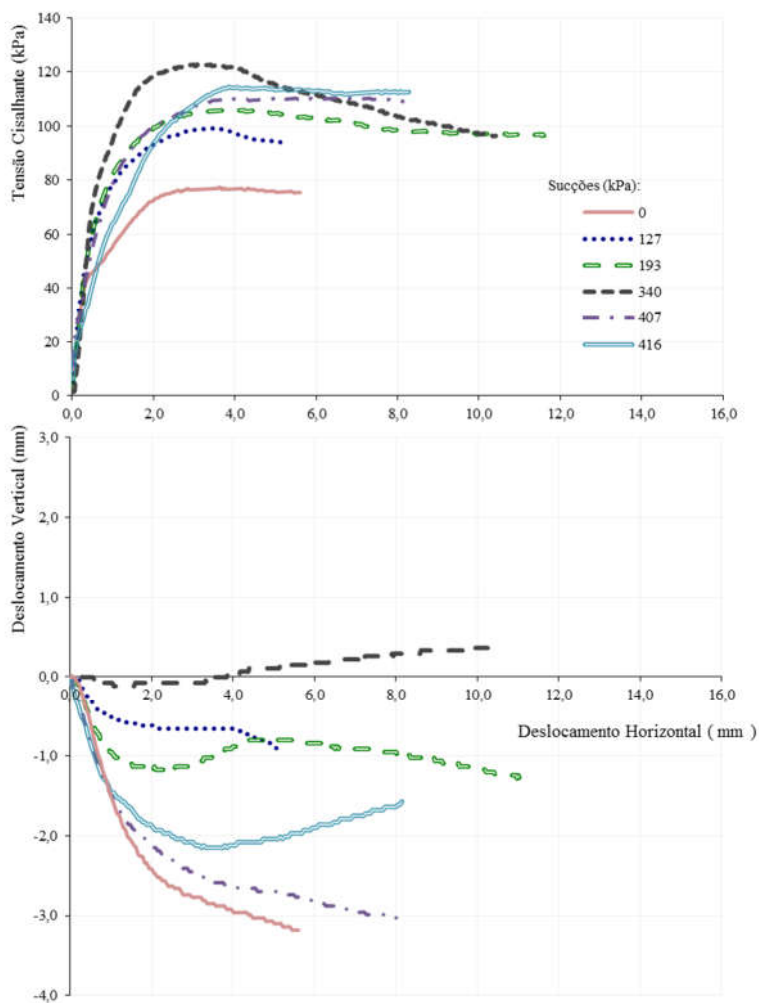
Apesar da limitação em termos de controle de sucção, velocidade de ensaio, variação de umidade e consequentemente poropressão, foi possível perceber que na maioria dos solos há uma variação de resistência da menor para a maior sucção, ficando evidente que solos saturados possuem uma menor resistência e que esse ensaio pode ser aplicado para análise simples.

Figura 76 – Ensaio de cisalhamento direto– estágio 1: 50kPa – Residual de diabásio



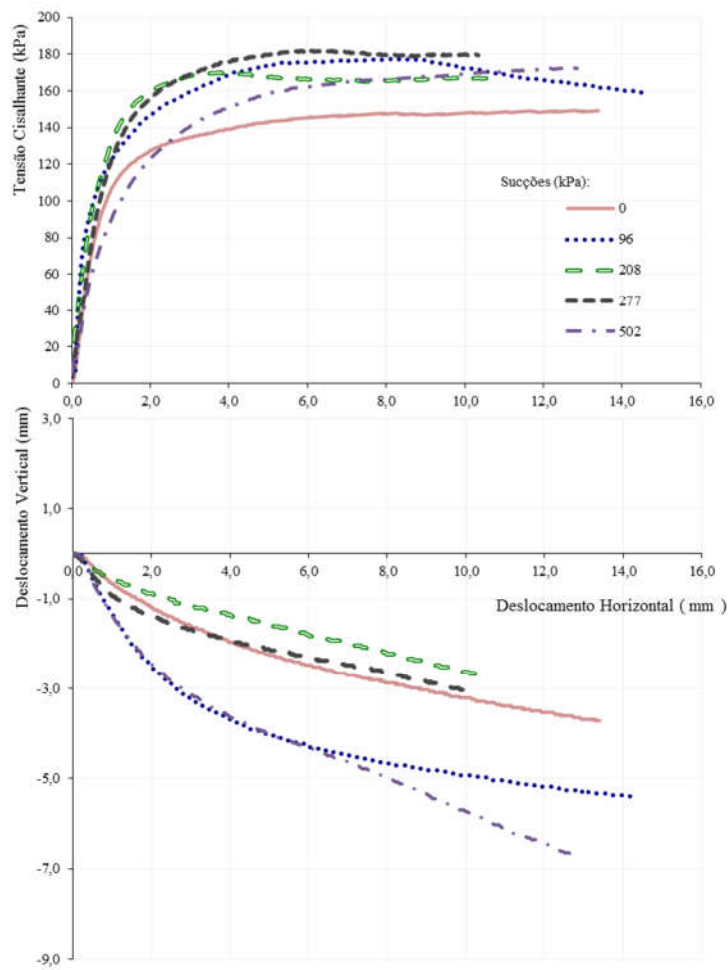
Fonte: Autor

Figura 77 – Ensaio de cisalhamento direto – estágio 2:100kPa – Residual de diabásio



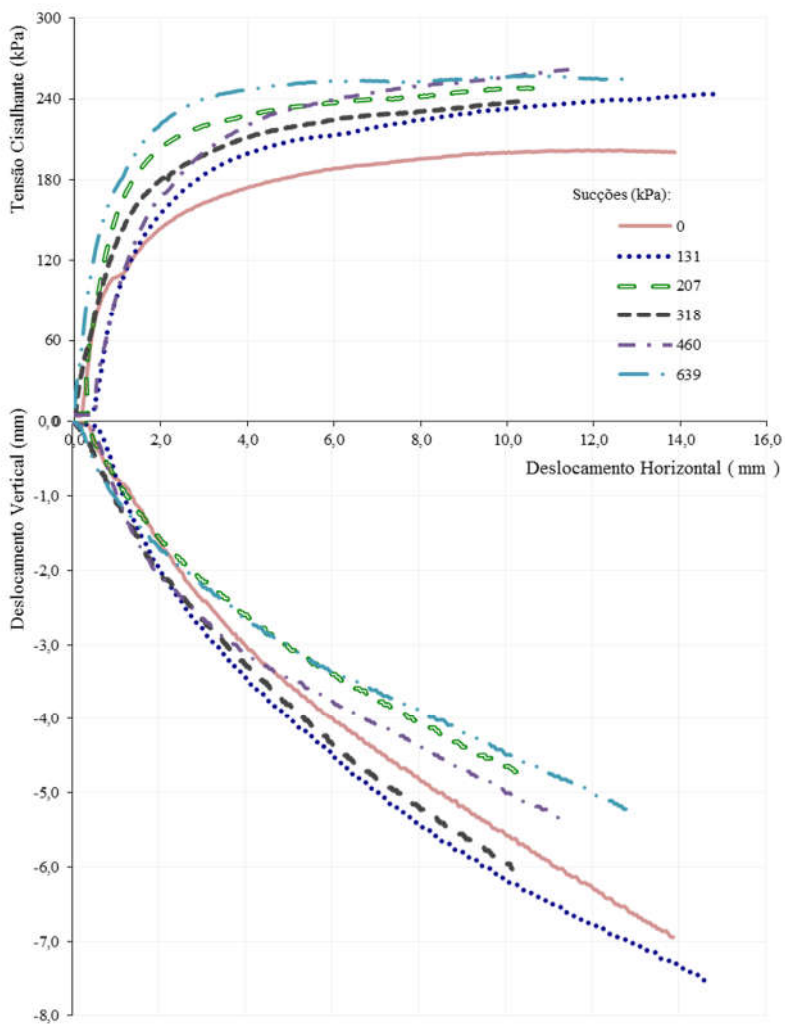
Fonte: Autor

Figura 78 – Ensaio de cisalhamento direto – estágio 3:200 kPa – Residual de diabásio



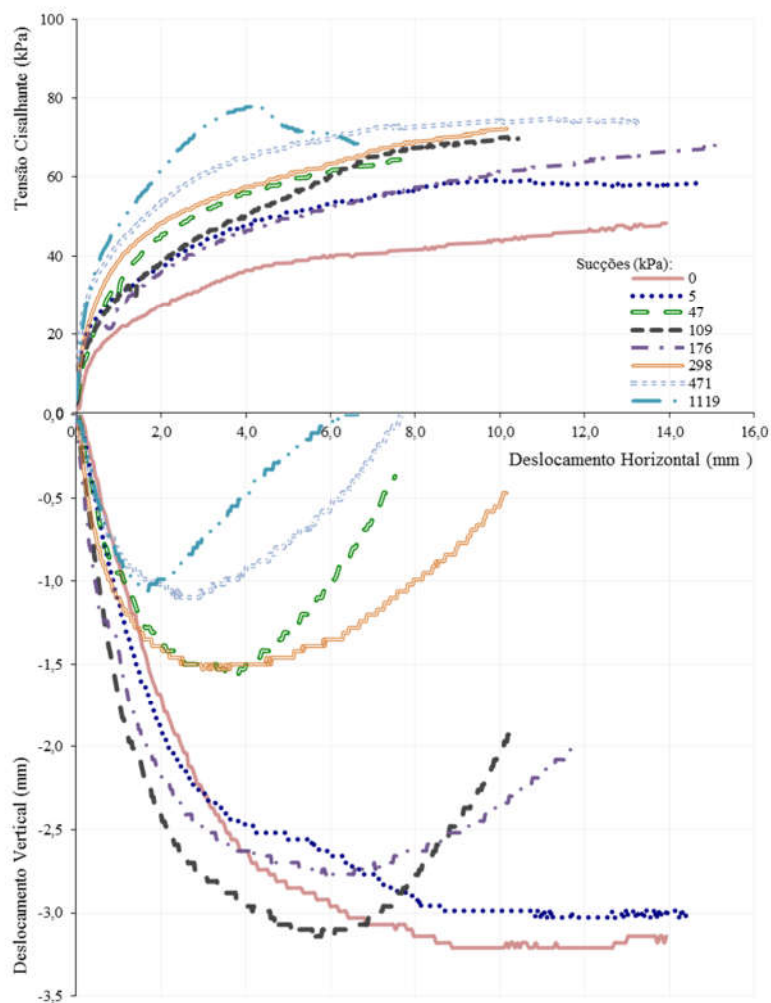
Fonte: Autor

Figura 79 – Ensaio de cisalhamento direto– estágio 4:300kPa – Residual de diabásio



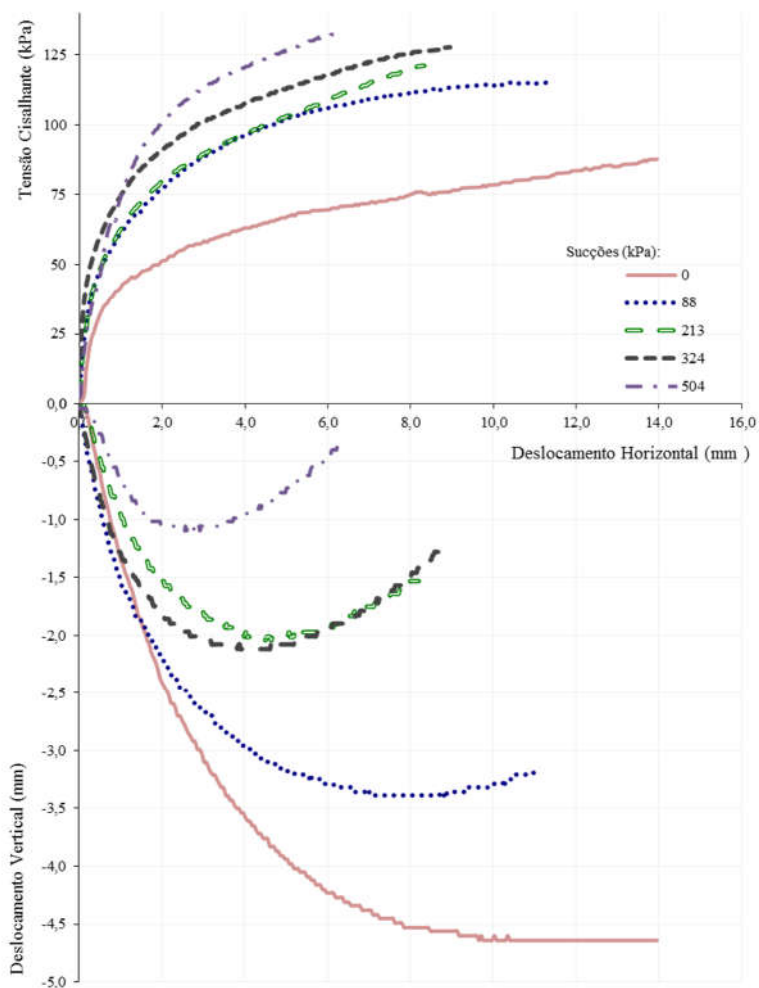
Fonte: Autor

Figura 80 – Ensaio de cisalhamento direto – estágio 1: 50 kPa – Residual de Granito



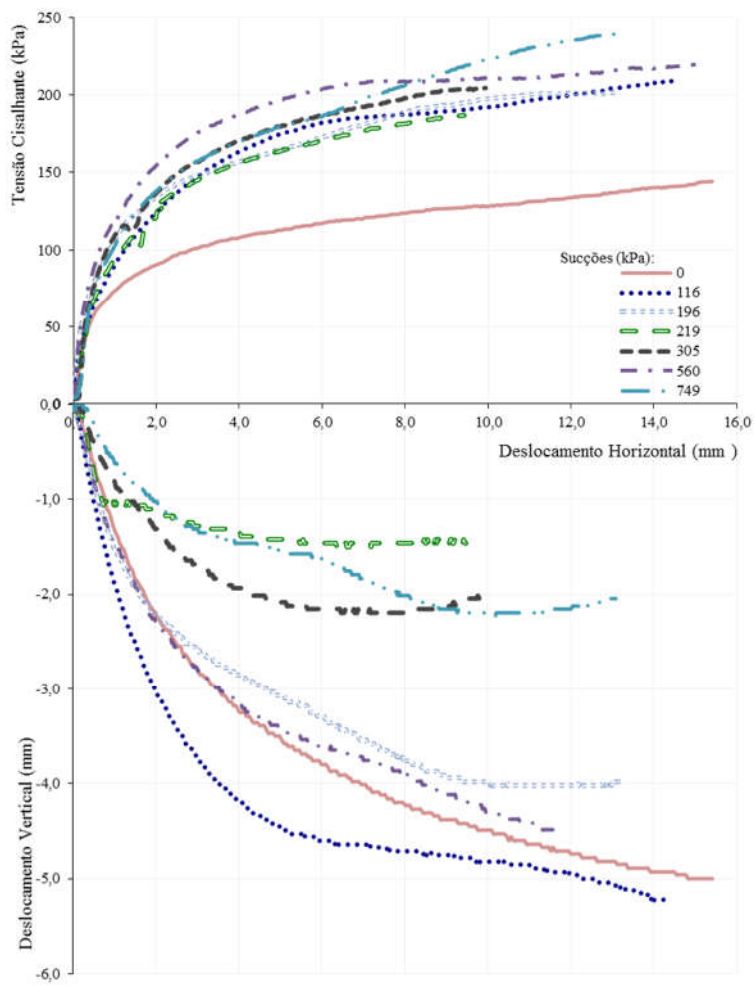
Fonte: Autor

Figura 81 – Ensaio de cisalhamento direto– estágio 2: 100 kPa – Residual de granito



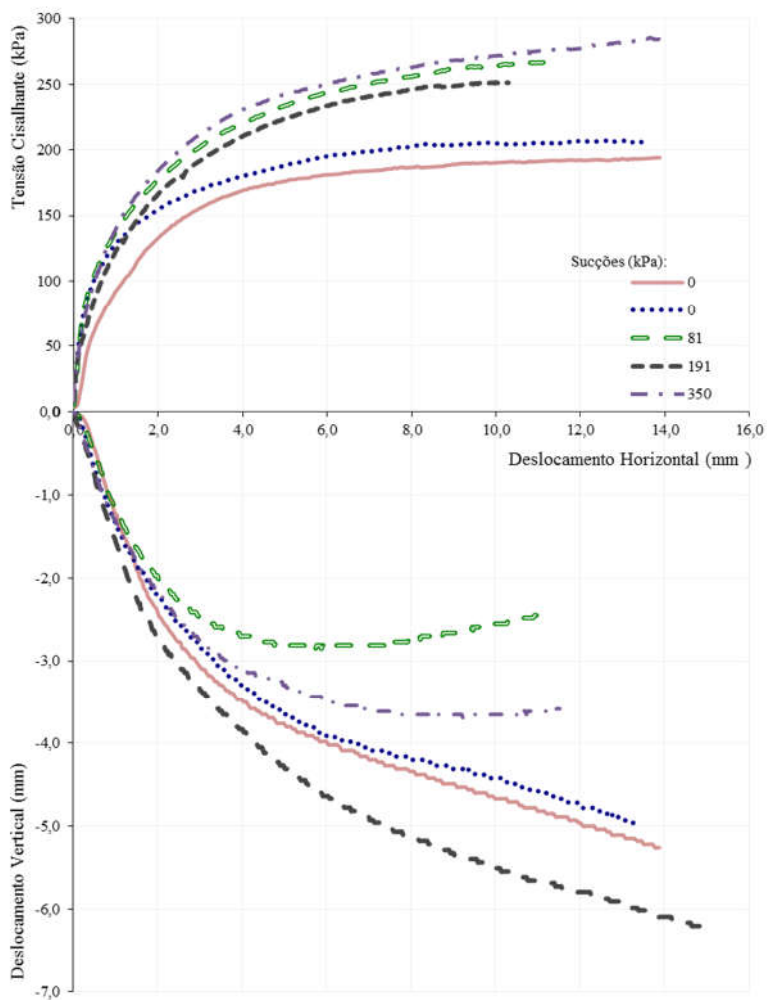
Fonte: Autor

Figura 82 – Ensaio de cisalhamento direto– estágio 3: 200 kPa – Residual de granito



Fonte: Autor

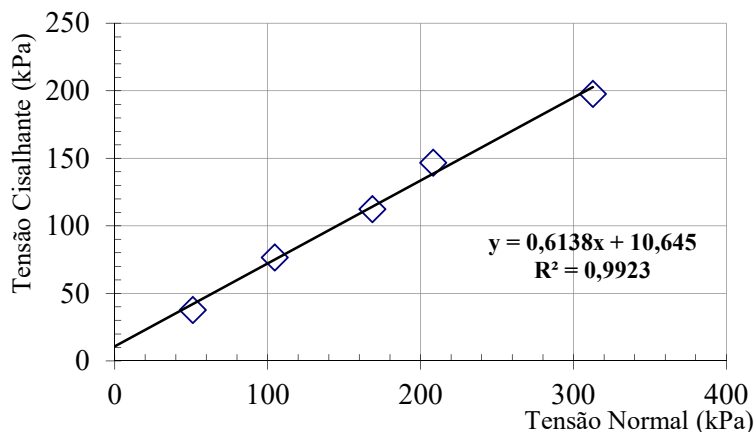
Figura 83 – Ensaio de cisalhamento direto – estágio 4: 300kPa – Residual de granito



Fonte: Autor

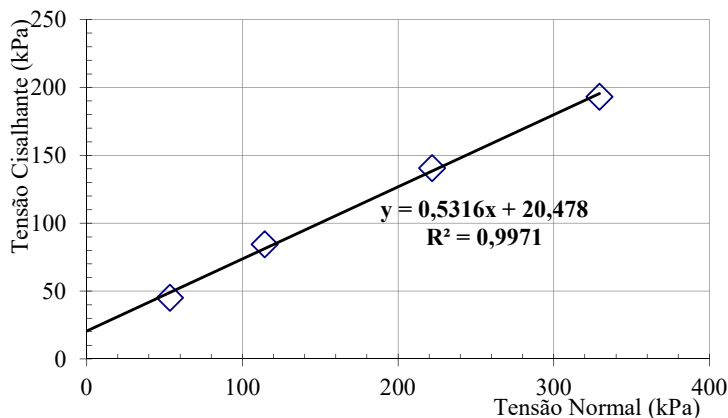
As Figura 84 e Figura 85 representam um gráfico convencional de função linear obtido com os dados experimentais na condição inundada (sucção nula). Os dados obtidos para essa condição mostram valores de ϕ' de $31,54^\circ$ para o solo residual de diabásio e $29,04^\circ$ para o solo residual de granito.

Figura 84 – Reta obtida na condição inundada para o solo residual de diabásio



Fonte: Autor

Figura 85 – Reta obtida na condição inundada para o solo residual de granito



Fonte: Autor

5.5 DEFINIÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO

Com a obtenção dos dados experimentais de sucção e umidade volumétrica, foi possível utilizar equações de ajuste para formar a curva de retenção de cada solo.

Os valores da Tabela 15 e Tabela 17 correspondem aos resultados experimentais de sucção relacionados à umidade volumétrica do solo residual de diabásio e residual de granito respectivamente. A

Tabela 16 e Tabela 18 corresponde aos coeficientes obtidos no software Soil Vision para cada solo. A Figura 86 e Figura 87 correspondem aos gráficos obtidos com as equações de ajuste de Fredlund e Xing (1994) e Van Genuchten (1980). Por fim, a Figura 88 corresponde os gráficos dos dois solos com a equação mais adaptada aos dados experimentais.

Tabela 15 – Dados experimentais de sucção e umidade volumétrica – Residual de diabásio

Sucção (kPa)	Θ (%)
6	54,85
16	53,60
75	50,60
284	49,37
1593	43,18
6146	27,63
12975	15,60
18199	9,73
23328	6,28

Fonte: O autor

Tabela 16 – Coeficientes obtidos pelo software *Soil Vision* – Residual de diabásio

Itacorubi - Van Genuchten

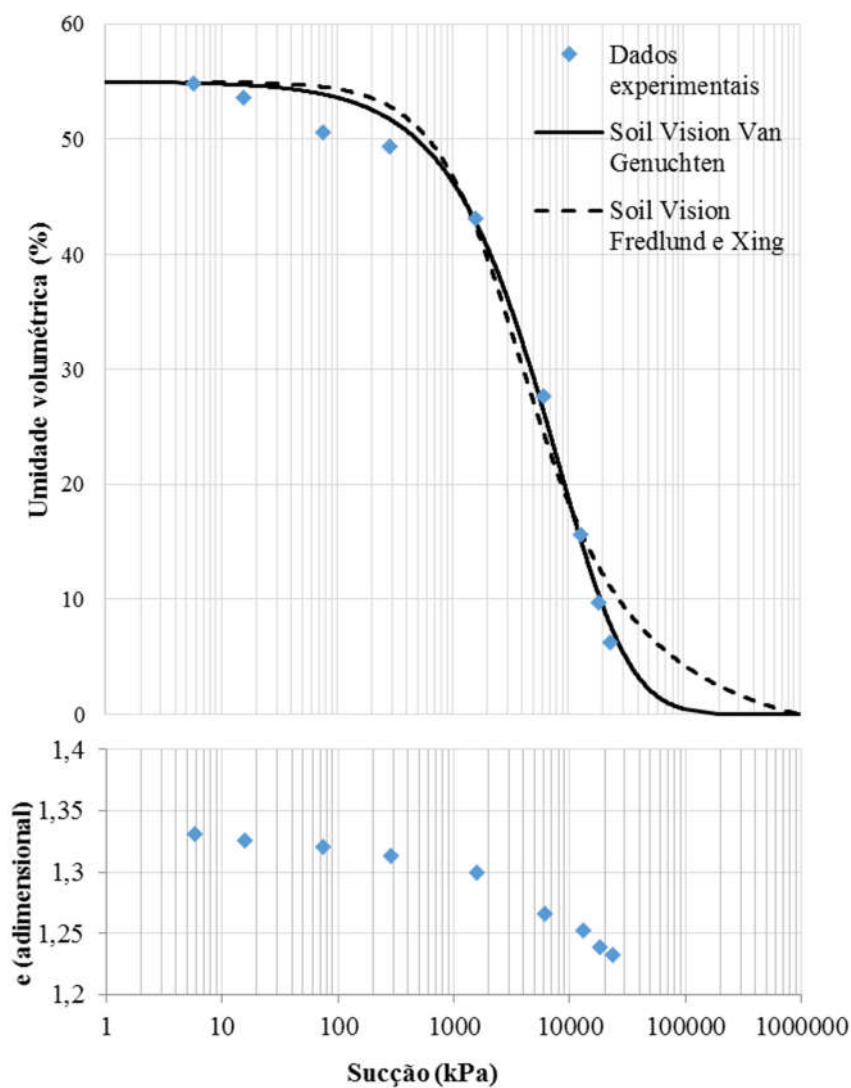
Θ_{sat} (%)	55
Θ_{res} (%)	0
alfa	1,96E-05
n	0,837273775
m	4,703716798
R ²	0,9933
VEA (kPa)	928,38

Itacorubi – Fredlund e Xing (1994)

Θ_{sat} (%)	55
Θ_{res} (%)	6,6945
alfa	2499,8755
n	1,1946
m	1,4109
Ψ_{residual} (kPa)	20186,34
R ²	0,9716
VEA (kPa)	684,5

Fonte: O autor

Figura 86 – Curva de Retenção solo residual de diabásio



Fonte: Autor

Tabela 17 – Dados experimentais de sucção e umidade volumétrica –Residual de granito

Sucção (kPa)	Θ (%)
13	48,72
141	46,03
1062	44,39
4217	39,68
6604	33,66
17791	22,43
20344	15,05

Fonte: O autor

Tabela 18 – Coeficientes obtidos pelo *software Soil Vision* Residual de granito

Cacupé - Van Genuchten

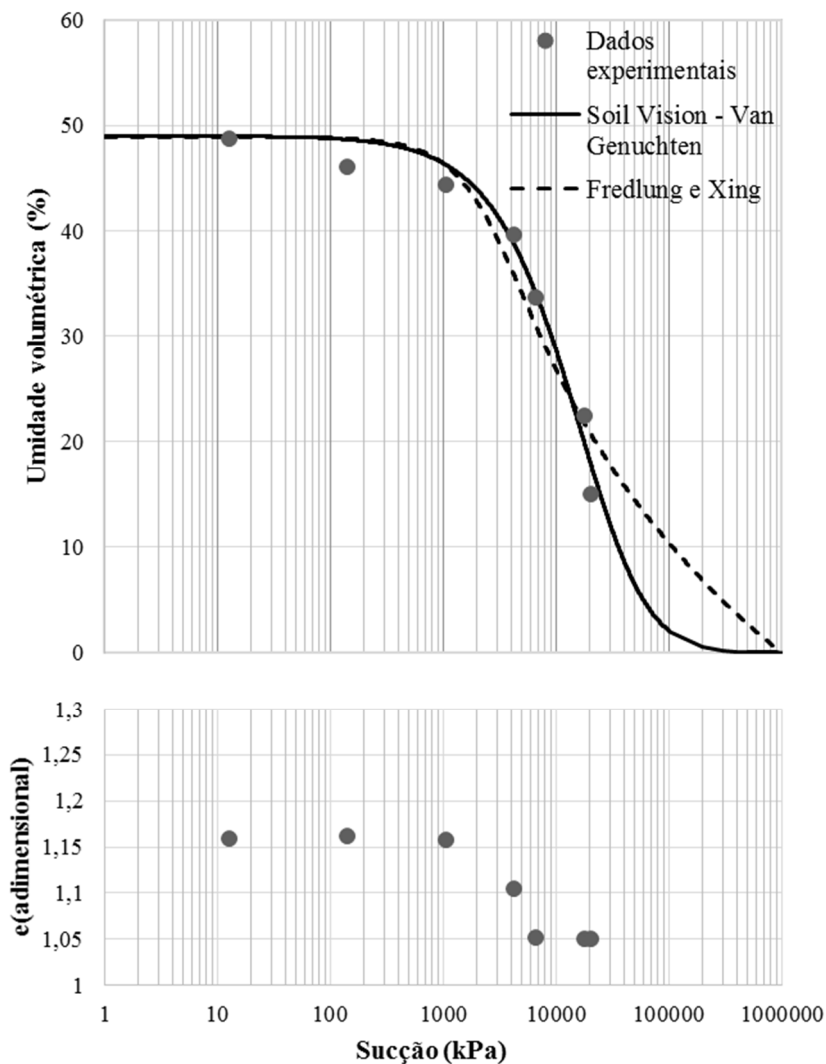
Θ_{sat} (%)	49
Θ_{res} (%)	0,000142308
alfa	2,68242E-05
n	1,041046554
m	2,365656975
R ²	0,9759
VEA (kPa)	2719,15

Cacupé - Fredlund e Xing (1994)

Θ_{sat} (%)	48,92
Θ_{res} (%)	18,1187
alfa	2499,986207
n	1,620924134
m	0,559227065
Ψ_{residual} (kPa)	27942,71
R ²	0,9355
VEA (kPa)	1260,7

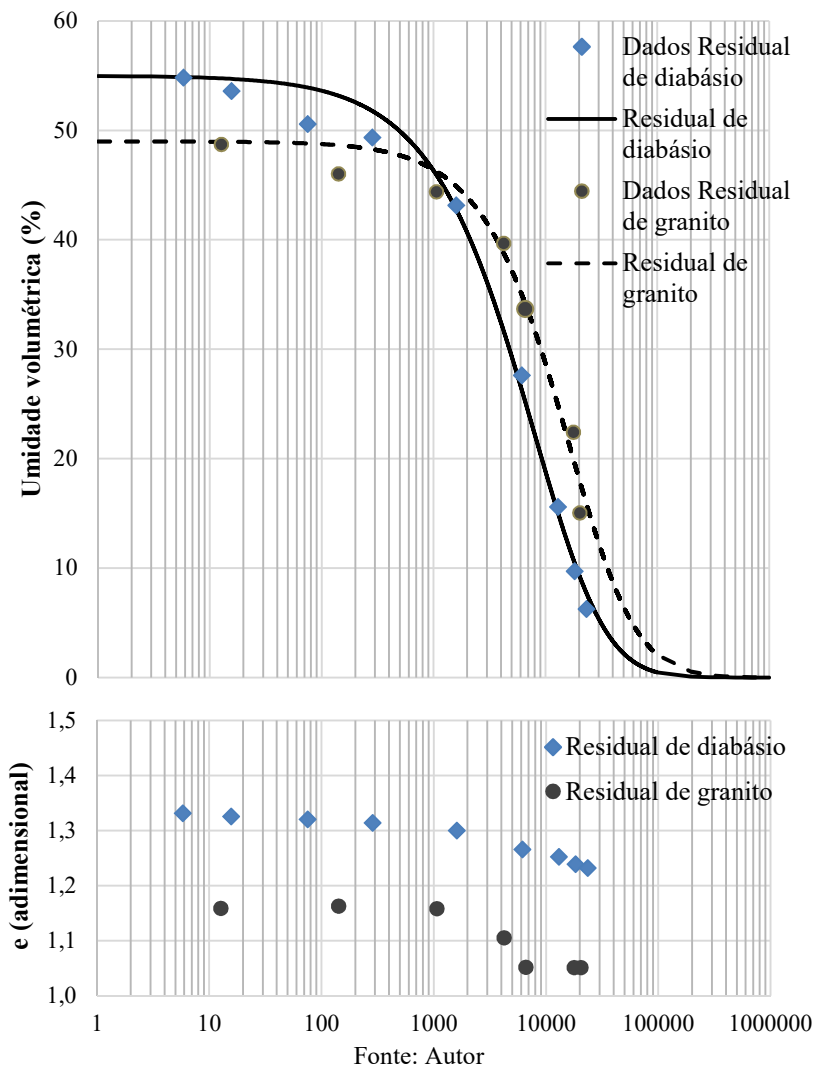
Fonte: O autor

Figura 87 – Curva de Retenção solo residual de granito



Fonte: Autor

Figura 88 – Curva de Retenção do solo com as equações de ajuste



Analisando-se os modelos aplicados para ajuste dos dados experimentais das curvas de retenção do solo residual de diabásio e de granito, percebeu-se que o modelo proposto de Van Genuchten (1980) foi

o que melhor se ajustou para ambos os casos, e este foi o escolhido para representar a curva de retenção.

Não houve uma boa representação do ponto de valor de entrada de ar para os dois solos, principalmente para o solo residual de diabásio que não mostra uma linearidade de valores de umidade volumétrica com o aumento de sucção até o ponto de entrada de ar.

O valor de umidade volumétrica residual da curva de retenção ajustada matematicamente foi de 0 (%) para ambos os solos e assim, correspondendo a valores superior a 100000 kPa de sucção, que são significativos em solos argilosos (Segundo Vanapalli, 1996).

Para sucções da ordem de 20.000 kPa, houve uma redução do índice de vazios de forma contínua para o solo residual de diabásio. Para o solo residual de granito observa-se uma tendência à estabilização da redução do índice de vazios para sucções de até 10.000 kPa, permanecendo constante para valores maiores que este.

Observando-se a Figura 88, percebe-se que as curvas se diferenciam principalmente para valores de umidade de saturação iniciais, este efeito pode ser devido a maior presença de silte no solo residual de diabásio. Além disso os pontos experimentais indicam que a entrada de ar já ocorreu para sucções da ordem de 10 kPa devido a existência de grandes poros nos solos residuais indeformados. As equações matemáticas definem uma entrada de ar muito maior do que 10 kPa.

5.6 DEFINIÇÃO DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA

A Tabela 19 e Tabela 20 mostram os valores de tensão normal (kPa) aplicados, para as sucções encontradas e, assim os dados de resistência ao cisalhamento obtidos resumidamente para o solo residual de diabásio e granito respectivamente.

Tabela 19 – Dados de entrada –Residual de diabásio

Nº	Tensão normal (kPa)	Sucção (kPa)	Resistência ao cisalhamento obtida (kPa)
1	51	0	37,82
2	102	0	76,91
3	150	0	112,63
4	51	115	55,78
5	51	89	49,99
6	51	62	51,24

7	200	208	165,45
8	51	187	72,68
9	102	340	121,7
10	102	127	97,04
11	200	0	146,99
12	102	407	109,77
13	310	207	232,95
14	51	2561	70,52
15	51	318	77,92
16	51	433	81,87
17	200	96	164,62
18	310	639	255,75
19	102	416	113,28
20	200	502	171,86
21	310	131	232,19
22	x	13	x
23	310	460	251,66
24	310	0	197,84
25	310	318	233,03
26	200	277	179,49
27	102	192	105,18

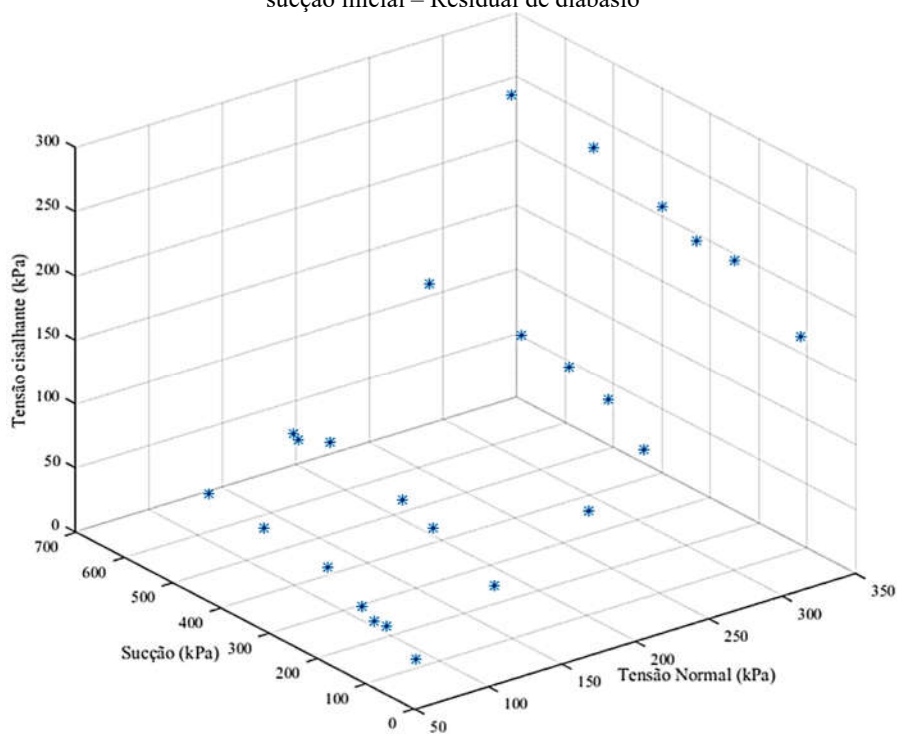
Fonte: O autor

Tabela 20 – Dados de entrada –Residual de granito

Nº	Tensão normal (kPa)	Sucção (kPa)	Resistência ao cisalhamento (kPa)
1	200	749	224,01
2	51	0	45,26
3	51	47	60,7
4	102	0	84,64
5	300	191	254,1
6	x	x	x
7	x	x	x
8	300	0	193,29
9	x	x	x
10	51	5	58,63
11	x	x	x
12	200	0	140,86
13	200	219	186,66
14	300	0	198,83
15	200	195	197,85
16	102	213	112,09
17	200	560	209,24
18	51	1120	77,48
19	51	176	64,87
20	102	88	105,55
21	51	109	64,47
22	51	471	74,04
23	200	115	186,91
24	102	324	124,2
25	300	81	240,18
26	200	305	202,04
27	51	298	67,48
28	102	504	130,64
29	300	350	257,36

A partir desses dados definidos para os valores de tensão normal líquida (x), sucção (y) e tensão cisalhante na ruptura (z).As Figura 89 eFigura 90 representam os pontos inseridos no gráfico para os solos residual de granito e diabásio.

Figura 89 – Pontos experimentais dos ensaios de cisalhamento direto com medida da sucção inicial – Residual de diabásio



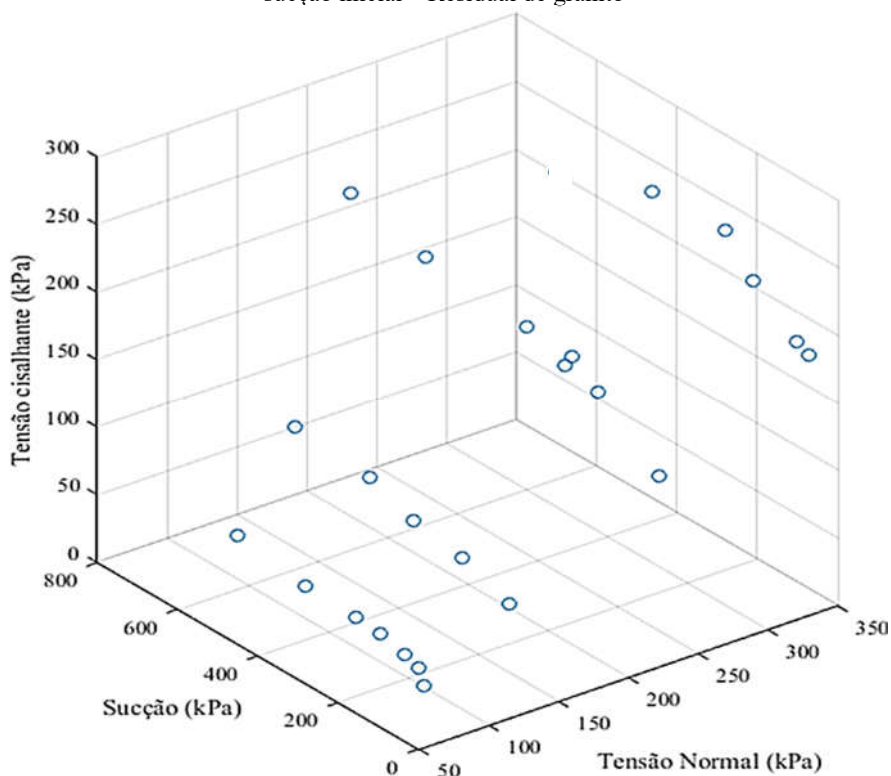
Fonte: Autor

Com os dados colocados no gráfico, a melhor superfície que se adaptou aos pontos do solo residual de diabásio foi dada por uma equação polinomial de segundo grau em relação ao eixo $x(\sigma - u_a)$ e $y(u_a - u_w)$, dada pela equação (13), com R^2 de 0,9864:

$$\begin{aligned} \tau(x, y) = & 10,23 + 0,632(\sigma - u_a) + 0,1596(u_a - u_w) \\ & - 2,324 \times 10^{-5}(\sigma - u_a)^2 \\ & - 1,075 \times 10^{-5}(\sigma - u_a)(u_a - u_w) \\ & - 0,000164(u_a - u_w)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

Onde: $(u_a - u_w)$ é a tensão normal líquida dada pela abscissa;
 $(u_a - u_w)$ é a sucção dada pela ordenada.

Figura 90 – Pontos experimentais dos ensaios de cisalhamento direto com medida da sucção inicial – Residual de granito



Fonte: Autor

A melhor superfície que se adaptou aos pontos do solo residual de granito foi dada por uma equação polinomial de terceiro grau em relação ao eixo $x(\sigma - u_a)$ e segundo grau em relação ao eixo $y(u_a - u_w)$, dada pela equação (14), com R^2 de 0,9801:

$$\begin{aligned}
 \tau(x, y) = & 25,85 + 0,5379(\sigma - u_a) - 0,05985(u_a - u_w) \\
 & + 0,0003124(\sigma - u_a)^2 \\
 & + 0,00223(\sigma - u_a)(u_a - u_w) \\
 & + 4,289 \times 10^{-5}(u_a - u_w)^2 \\
 & - 8,752 \times 10^{-7}(\sigma - u_a)^3 \\
 & - 3,345 \times 10^{-6}(\sigma - u_a)^2(u_a - u_w) \\
 & - 1,292 \times 10^{-6}(\sigma - u_a)(u_a - u_w)^2
 \end{aligned} \tag{14}$$

Onde: $(u_a - u_w)$ é a tensão normal líquida dada pela abscissa;
 $(u_a - u_w)$ é a sucção dada pela ordenada.

As Figura 91 e Figura 92 representam a superfície de ruptura definida para valores de tensão normal entre de 50 kPa a 350 kPa e de valores de sucções até 650 kPa.

Figura 91 – Superfície de ruptura – Residual de diabásio

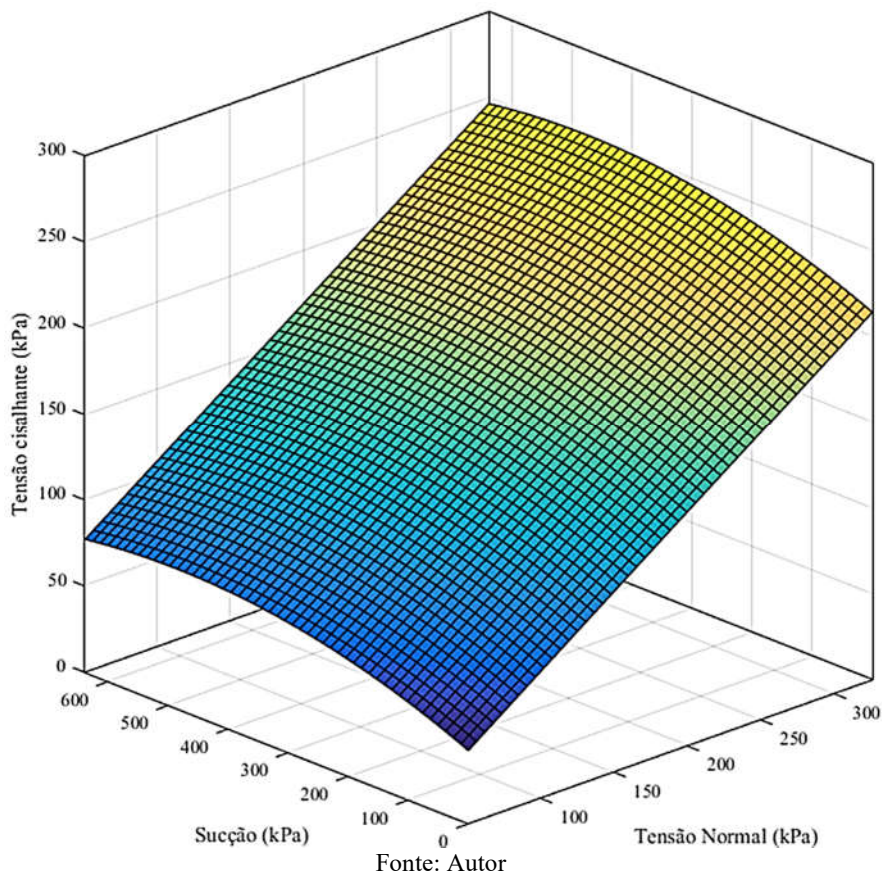
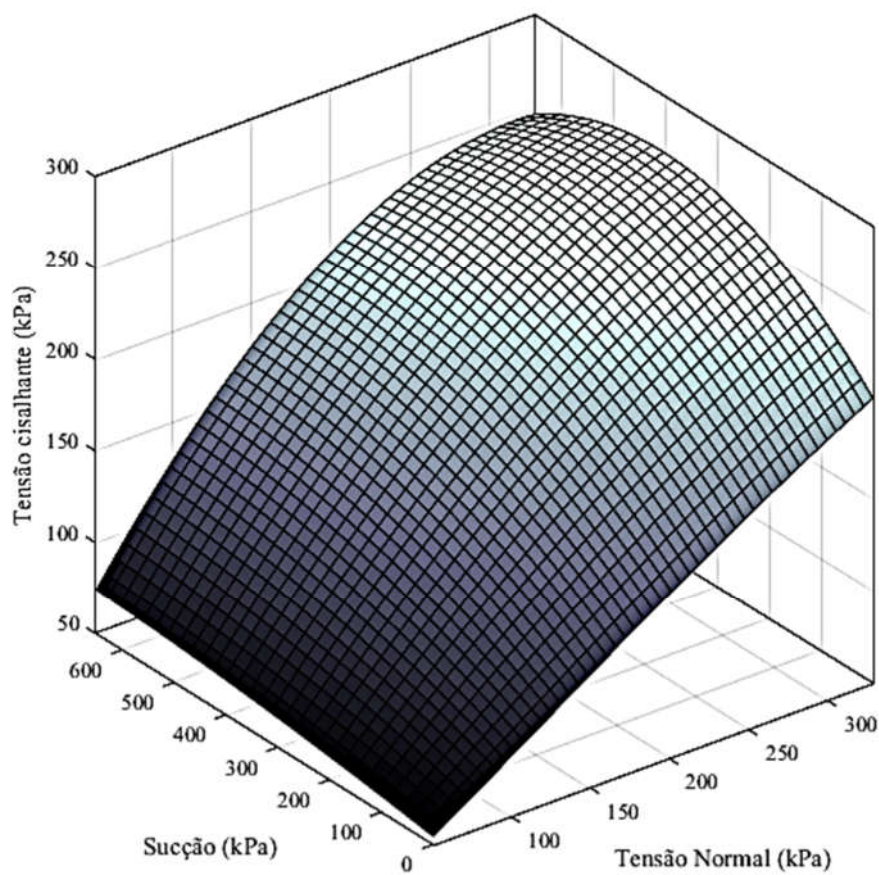


Figura 92 – Superfície de ruptura – Residual de granito



Fonte: Autor

5.7 ANÁLISES

Por fim, através da superfície de ruptura, houve a previsão de gráficos 2D, sendo possível analisar os dados obtidos da superfície e responder algumas hipóteses da literatura que estão relacionadas ao comportamento do solo não saturado.

5.7.1 Linearidade

É possível perceber neste trabalho que para solos residuais, de modo geral, as pesquisas de Fredlund e Xing (1978) sobre a consideração linear, não são existentes, isto é percebido na função polinomial encontrada para os solos.

Para responder esta dúvida foram obtidos os gráficos da Figura 93 e Figura 94 que mostra a relação τ *versus* sucção aplicados para tensões normais líquidas de 0, 50, 100, 200, 300 kPa. Para tensões normais líquida baixas (50 kPa), é possível aplicar uma função linear, ou seja, as propostas de Fredlund et al (1987) em que pode avaliar o solo a partir de intervalos é possível, desde que seja bem especificada.

Pode-se verificar também que a não linearidade das funções ficam mais evidentes com o aumento de tensão normal líquida para os dois solos estudados.

Figura 93 – Planos da superfície de ruptura - Solo Residual de diabásio

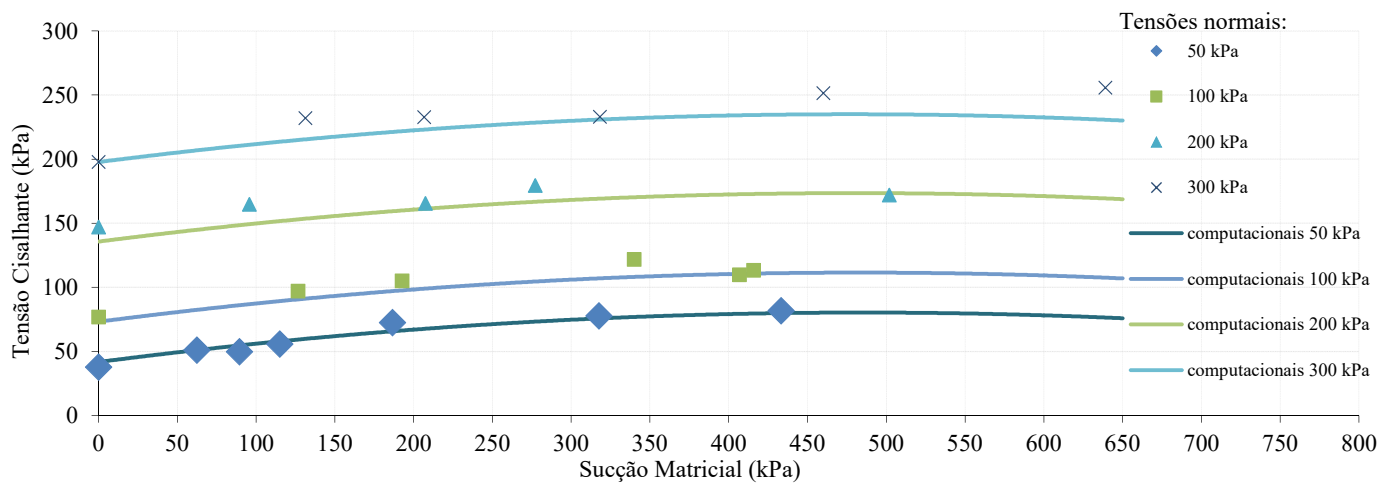
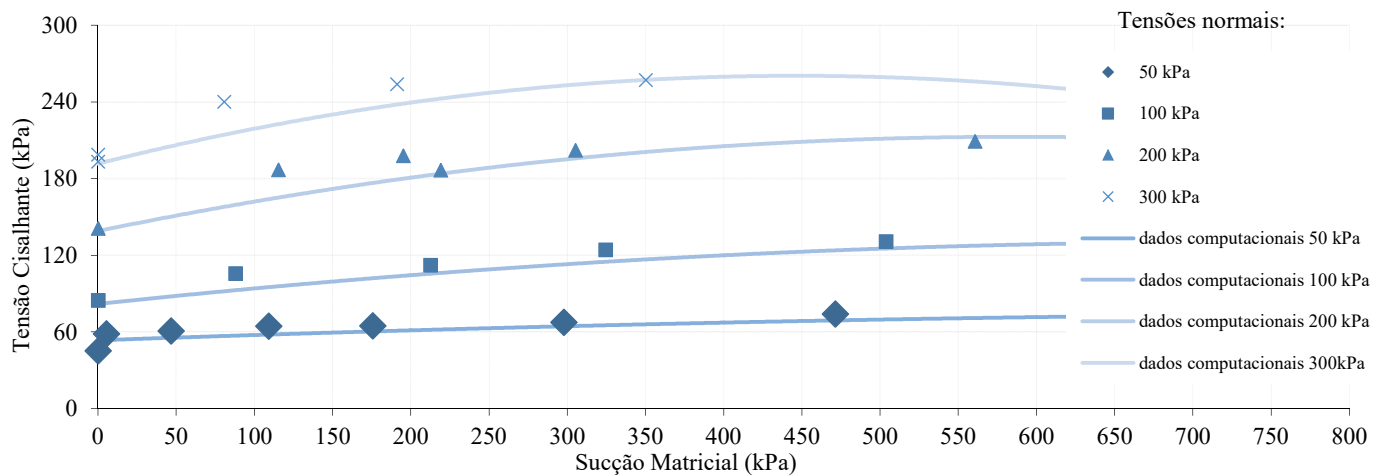


Figura 94 – Planos da superfície de ruptura - Solo Residual de granito



5.7.2 Relação do ângulo ϕ^b e ϕ'

Conforme Figura 95 e Figura 96, os valores de ângulo ϕ^b iniciais, no solo residual de diabásio, foram 9° , e, para o solo residual de granito houve variação de 2 a 17° dependendo da tensão normal aplicada. O fato é que para valores de sucção menores que o valor de entrada de ar (10 kPa), o ângulo ϕ^b deve ser igual a ϕ' . No entanto não se têm resultados de ensaios experimentais, para se concluir isto.

No entanto, a não linearidade da relação entre a resistência ao cisalhamento e a sucção implica em variações nos valores de ϕ^b . Desse modo, ao analisar o ajuste matemático, com o aumento da sucção, os valores do ângulo de atrito devido à sucção (ϕ^b) diminuem, até chegarem a valores negativos.

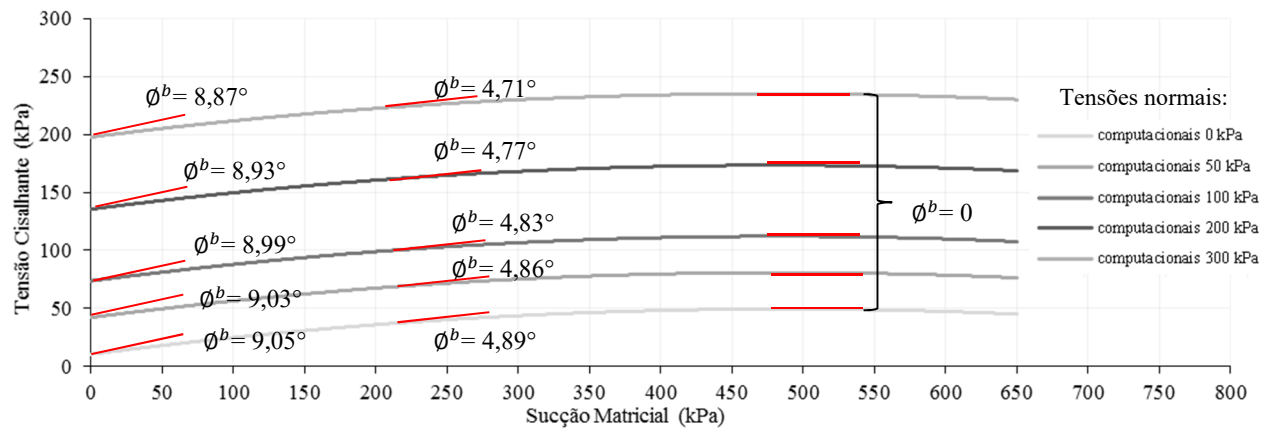
Rassam e Cook, (2002), dizem que esta diminuição é devida ao valor de entrada de ar no solo iniciar a partir de sucções menores que 50 kPa, que mostra compatível a este estudo, pois os valores de entrada de ar foram de 10 kPa, para ambos solos.

Em contrapartida, os pontos experimentais não indicam que ϕ^b é negativo. Os valores negativos também podem ocorrer e isto é o esperado para solos mais arenosos. Porém, ao analisar a Figura 93 e Figura 94, os pontos experimentais não definem uma redução de ϕ^b e sim que tendem para zero quando se aproxima de 500 kPa. Os solos muito argilosos, para valores elevados de sucção, tendem a ϕ^b maior que zero ou constante. No entanto, os solos de comportamento siltoso que tem a tendência semelhante ao que foi encontrado neste trabalho, faz com que ϕ^b fique igual a zero com o aumento de sucção.

Assim, pode-se dizer que esta função polinomial funciona com ϕ^b maiores que zero, para valores de sucções de 0 a 500 kPa, ao qual é o mais correto a ser empregado.

Com essas condições, o incremento baixo de ϕ^b faz com que o aumento da resistência ao cisalhamento seja evidenciado pela tensão normal líquida aplicada, ângulo de atrito para estes tipos de solos estudados. O ângulo de atrito para sucções iguais a zero foi de 35° , para o solo residual de diabásio, e de 43° a 31° , para o solo residual de granito, (dependendo da tensão normal aplicada), o qual deixa evidente que a relação ϕ^b e ϕ' é sempre menor que um.

Figura 95 – Valores de ϕ^b - Solo Residual de diabásio



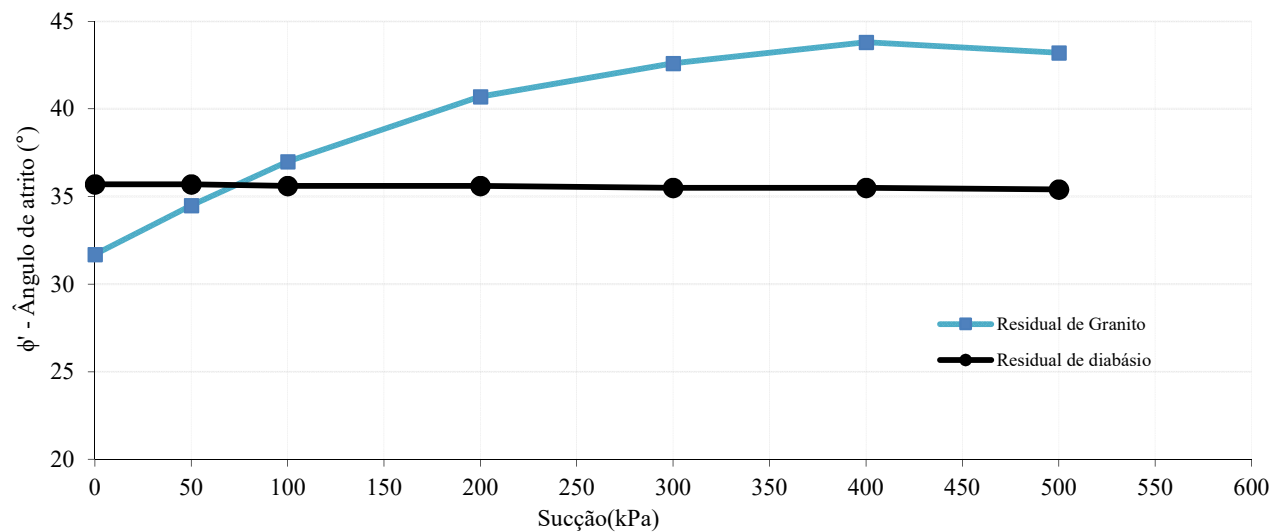
5.7.3 Variação do ângulo ϕ' com o aumento de sucção

A Figura 97, representa a relação ângulo de atrito versus Sucção, para os solos residual de diabásio e granito.

Ao se observar o comportamento do ângulo de atrito com o aumento de sucção (Figura 97) percebe-se que há uma diminuição para o solo residual de diabásio, porém bem pequena, podendo neste caso considerar o ângulo de atrito constante. Porém para o solo residual de granito, houve um aumento considerável para cada faixa de sucção, mostrando que para os dois casos a variação do ângulo de atrito, participa de forma considerável somente para o solo residual de granito.

No entanto, ao comparar com dados da literatura: Reis e Vilar (2004) obtiveram ângulo de atrito constante e Escario e Sáez (1986) também. Porém, segundo Feuerharmel (2007), autores que não obtiveram essa constância no ângulo de atrito, não obtiveram explicação física para este feito, restando relacionar com mais estudos.

Figura 97 – Influência do Ângulo de atrito com o aumento de sucção – tensão líquida 200kPa



5.7.4 Relação entre a curva de retenção e envoltória de resistência

Analisando-se as duas curvas de retenção obtidas pelo Soil Vision (Figura 98) é possível perceber que os valores de entrada de ar são de aproximadamente 928 e 2719 kPa para o solo residual de diabásio e granito.

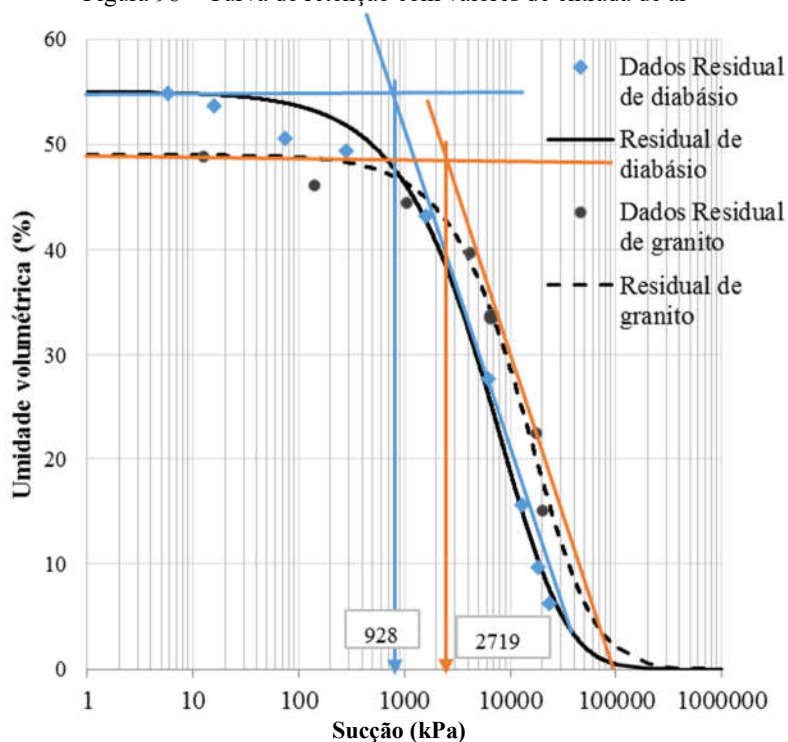
Os valores de entrada de ar, comparados com a envoltória de resistência não correspondem a valores de ϕ' igual a ϕ^b , ou seja, ϕ^b é menor que ϕ' até para valores menores que o valor de entrada de ar. Assim, para esse caso de estudo de solo indeformado as propostas de Vanapalli et al. (1996), Fredlund e Vanapalli (2002), não são válidas.

No entanto, os modelos de previsão da resistência ao cisalhamento que utilizam dados da curva de retenção devem aplicar para a sucção de entrada de ar o valor do início da dessaturação e não o valor de entrada de ar generalizada.

Desse modo, ao analisar detalhadamente a Figura 98, e assim, os dados experimentais da curva de retenção, do solo residual de diabásio, percebe-se que a variação da umidade volumétrica começa a partir de 10 kPa, mostrando que a dessaturação dos poros pode ter ocorrido antes do que foi encontrado na equação de ajuste. O mesmo ocorre para o solo residual de granito, a dessaturação pode ocorrer a partir de 10 kPa.

Com esses valores baixos de dessaturação (10 kPa) considerados, o formato da envoltória de resistência (τ x sucção), se adequam às propostas de Rassam e Cook (2002) e possivelmente as propostas de Vanapalli et al.(1996), Fredlund e Vanapalli (2002).

Figura 98 – Curva de retenção com valores de entrada de ar



Fonte: Autor

5.7.5 Representatividade da curva de retenção de solo indeformado

Com os dados de sucção e umidade volumétrica obtidos pelos moldes de solos indeformados, através da imposição de sucção mostrados no Apêndice B (solo residual de diabásio) e Apêndice C (solo residual de granito), foi possível verificar a representatividade da curva de retenção para esses dois solos indeformados, através da inserção dos valores de sucção dos moldes na curva de retenção principal obtida pelo corpo cilíndrico moldado.

As Figura 99 e Figura 100 representam a curva de retenção com os dados experimentais de umidade volumétrica e sucção encontrado nos moldes de cisalhamento pelo método da seção 4.2.3 e os dados encontrados experimentais dos corpos cilíndrico. Na legenda, é possível

verificar o número do molde e a letra (a), que significa o valor de umidade volumétrica definida pela umidade gravimétrica amolgada (após ensaio de cisalhamento).

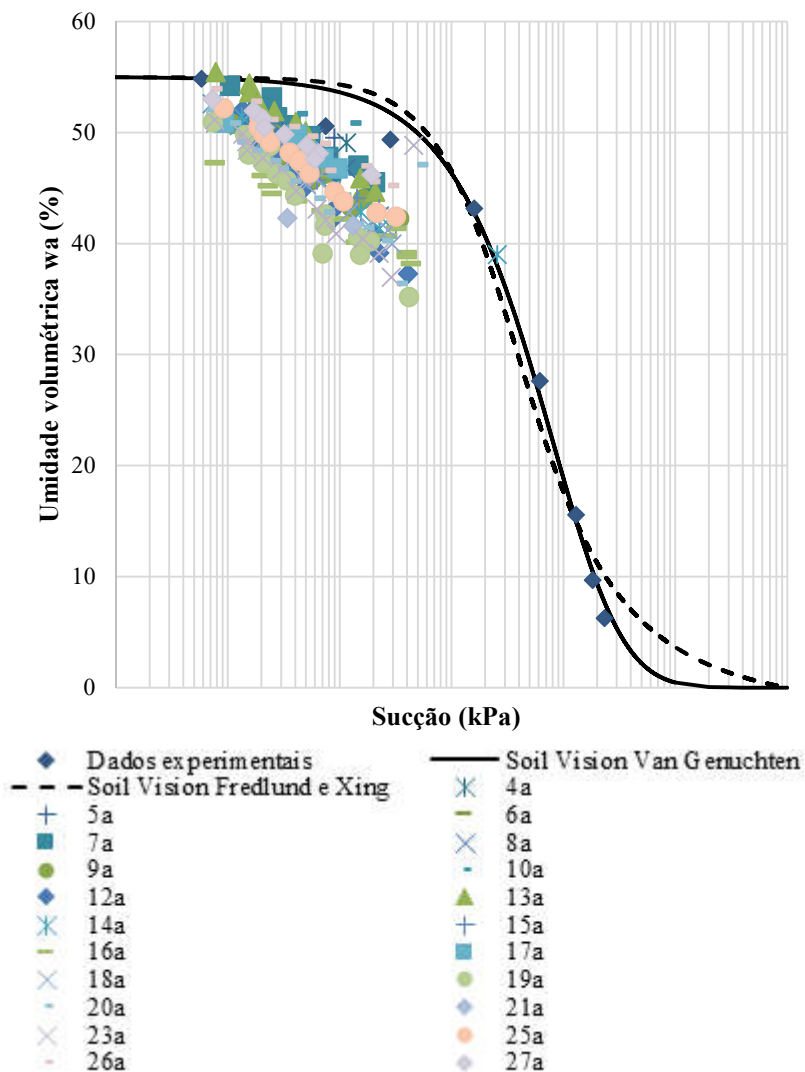
Para o solo residual de diabásio (Figura 99), o que se percebe, é que devido a heterogeneidade dos pontos, eles não se encontram muito próximos a equação de ajuste dos solos. Porém, é possível perceber que os dados possuem uma mesma forma, e, evidenciando que a entrada de ar do solo pode ser definida por valores de sucções baixas. Assim, há uma variação de valores iniciais de umidade volumétrica de 47% a 55% e moldes como 23, 14, 20 e 10 obteve um bom ajuste com a curva de retenção principal.

Para o solo residual de granito (Figura 100), é notória uma variação de umidade volumétrica iniciais de 55 a 26 %. Houve valores experimentais como dos moldes 17, 5 que ficaram bem definidos na curva, mostrando uma boa representatividade, verificou que estes possuem índices de vazios próximos (1,035 e 1,16). Também nota-se que o comportamento da curva é semelhante aos dados experimentais do corpo cilíndrico.

De modo geral, é possível verificar uma similaridade dessa curva que representa a sucção e a umidade para os dois solos com os dados dos moldes obtidos, principalmente para sucções iniciais, assim, há uma representatividade da curva em solos indeformados, porém deve-se tomar cuidado, pois por ser um solo de campo, cada amostra possui uma característica diferente.

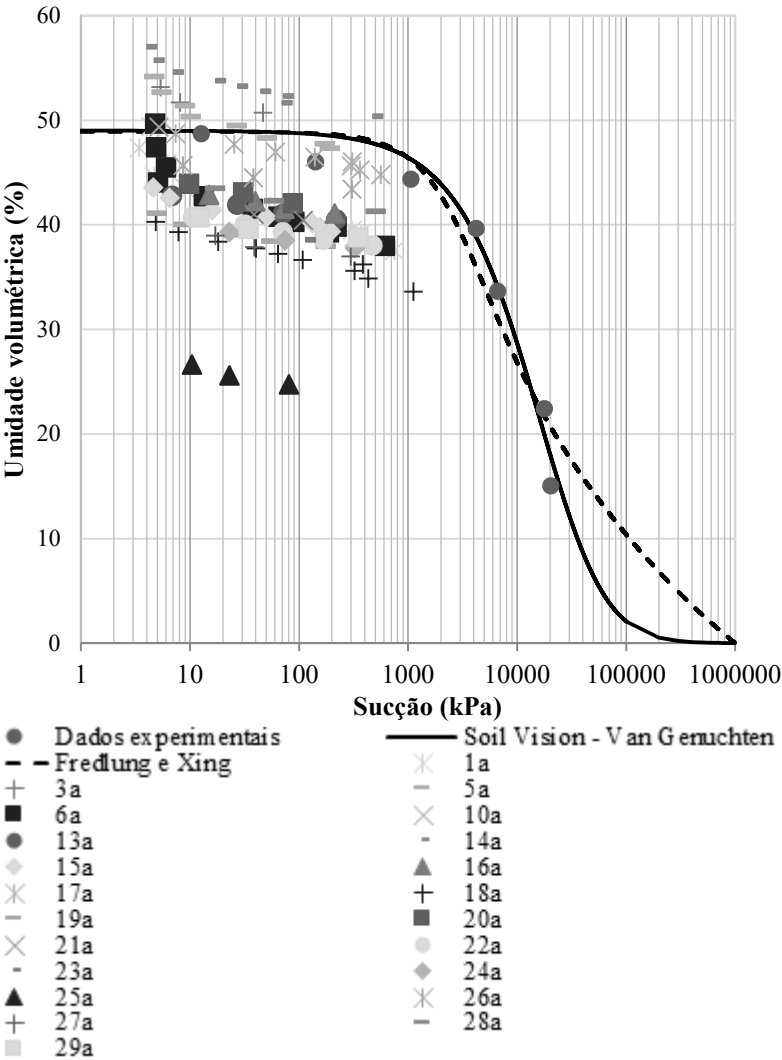
Desse modo, é necessário que os índices físicos (índices de vazios e umidade volumétrica), variação de volume e histórico de tensões sejam bem definidos, pois isto define a formação da curva de retenção.

Figura 99 – Representatividade da Curva de retenção – Residual de diabásio



Fonte: Autor

Figura 100 – Representatividade curva de retenção- Residual de granito



Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo principal da dissertação foi alcançado com a realização de ensaios de cisalhamento direto convencional com medição de sucção inicial do corpo de prova, aliados à técnica do papel filtro. As análises foram complementadas com ensaios de caracterização de modo a ajudar a obter uma visão mais detalhada dos aspectos geotécnicos dos dois locais de estudo.

A determinação dos parâmetros geotécnicos de dois solos residuais, da Ilha de Santa Catarina, com ênfase na mecânica dos solos não saturados, foi encontrada. Primeiramente com a escolha de dois solos localizados em regiões amostrais tipicamente diferentes: região do bairro Itacorubi, com o solo residual de diabásio, e bairro Cacupé, com o solo residual de granito.

Estes solos tipicamente residuais, com características lateríticas, apresentaram com um aumento de profundidade, uma massa específica de 2,59 a 2,89 (g/cm³), com cerca de 60% de argila para o solo residual de diabásio, e com massa específica de 2,52 a 2,68 (g/cm³), com cerca de 40% e 60% de argila, e evidência de areia grossa em toda a profundidade, para o solo residual de granito.

Adicionadas as informações da caracterização dos solos, foi possível verificar o comportamento desses solos, através da curva de retenção. Onde, os valores de entrada de ar pelo *Soil Vision* são de aproximadamente 928 e 2719 kPa, para o solo residual de diabásio e granito. Porém, ao analisar somente os dados experimentais, sucções menores já são capazes de introduzir ar na estrutura do solo (10 kPa para o solo residual de diabásio e granito, respectivamente), dessa forma mostra que deve ser avaliado a curva com cuidado e que as propostas de Rassin e Cook (2002) se adequam ao estudo.

Após verificar o comportamento do solo, com as análises de ruptura e sucção, foi possível definir os parâmetros de resistência, através da formação da superfície de ruptura. Desse modo foi possível perceber que a obtenção da superfície de ruptura com as 3 variáveis de tensão é de extrema importância. A partir da definição destes valores (sucção, tensão normal e tensão cisalhante), foi possível a formação da equação da superfície de ruptura do solo, chave principal para análise da influência da sucção nestes solos.

Ao se analisar a superfície de ruptura dos dois solos, percebe-se que os dados (sucção, tensão normal e cisalhante) se adequaram bem. Porém a medida que aumenta o valor de tensão normal aplicada, os pontos (x, y e z) vão saindo da linha da superfície, isto é bem perceptível no solo

residual de granito. Desse modo, a função polinomial e parâmetros encontrados ficam mais adequados para trechos definidos de sucção (0 a 475 kPa) e tensão normal líquida (50 a 300 kPa).

Para complementar a análise da influência da sucção em solos não saturados, houve a previsão de gráficos retirados da equação polinomial, para responder algumas hipóteses mostradas na literatura que estão relacionados ao comportamento do solo não saturado.

Desse modo, é possível perceber que, com respeito a linearidade, estes solos se adequam a uma característica não linear. Com relação a \emptyset^b e \emptyset' , houve incrementos pequenos de aumento de resistência, demonstrados pelos valores baixos (\emptyset^b), fazendo com que podem ter ocorrido devido ao pouco controle da situação de ensaio de cisalhamento. Porém com o aumento de tensão normal líquida este incremento de resistência fica mais evidente no solo residual de granito e constante para o solo de diabásio.

Com relação à representatividade da curva de retenção em solos indeformados, observando o gráfico com os dados experimentais obtidos, é possível perceber que os dados não se encaixam perfeitamente na curva de retenção encontrada pelo *software Soil Vision*, porém percebe-se que para cada solo, há uma mesma forma dos dados se comportarem. Com isso, deve-se ter cuidado, é necessário que os índices físicos (índices de vazios e umidade volumétrica), variação de volume, histórico de tensões sejam bem definidos, pois isto define a formação da curva de retenção. Assim mais estudos devem ser realizados para chegar a uma melhor representatividade.

Por fim, com toda essa análise, e a partir da junção desses dados, é possível dar início à formação de um banco de dados, que pode ser utilizado para análise de encostas e taludes no Município de Florianópolis –SC.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analisar a amostra de solo indeformada em relação a consolidação, o quanto afeta na variação do índice de vazios e consequentemente na sucção, antes e após o ensaio de cisalhamento.

Obter as curvas de retenção dos solos a partir de outros modelos de equações de ajuste e fazer comparações em relação ao R^2 , valor de entrada de ar, umidade residual e umidade de saturação.

Aplicar outros métodos de obtenção de sucção e comparar com o método demonstrado neste trabalho.

A partir dos parâmetros obtidos, verificar a variação da sucção com a variação do fator de segurança, com um modelo na realidade (por exemplo, um talude).

Verificar outras possíveis superfícies através de modelos de previsões como o de Vanapalli (1996) e fazer comparações entre esses modelos através da análise dos parâmetros encontrados, como ϕ^b e ϕ' .

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6459**. Solo: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, p. 6. 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6580**. Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, p. 3. 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7180**. Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, p. 3. 1984.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7181**. Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, p. 13. 1984.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080-04**. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated. United States, p. 30. 2004.

BISHOP, A. W. et al. Factors controlling the shear strength of partly saturated cohesive soils. In: Conference on Shear Strength of Cohesive Soils Univ. of Colorado. **Anais.**, Boulder, 1960. p 503-532.

BLIGHT, G. E. The vadose zone soil-water balance and transpiration rates of vegetation. **Géotechnique**, p. 55-64, 2013.

CAMPOS, L. G. **Variação Sazonal do Fator de Segurança Global da Estabilidade de Um talude de Solo Residual de Diabásio**. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - UFSC. Florianópolis, p. 139. 2015.

CAMPOS, T. M. P. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. In: 3º Simpósio de solos não saturados. **Anais.**, Rio de Janeiro, 1997.

CARUSO, M.; JOMMI, C. A prototype soil column to calibrate numerical models accounting for soil atmosphere interaction. In: Fifth international conference on unsaturated soil. **Anais.**, London, 2010. 1121-1130.

CARVALHO, J. C. et al. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, v. 1, 2015.

CASTRO, A. P. et al. Variação da sucção e da Umidade em um solo poroso não saturado. In: VII Simpósio Brasileiro de solos não saturados. **Anais.**, Fortaleza: ABMS, 2015.

CUI, Y. J.; TANG, A. M.; MANTHO, L. A. T. Monitoring Field soil suction using miniature tensiometer. **Geotechnical testing Journal**, p. 95-100, 2008.

DELAGE, P.; SILVA, G. P. R. S.; LAURE, E. Un nouvel appareil triaxial pour les sols non-saturés. In: 9th European Conference on Soil Mechanics, Dublin. **Proceedings**, 1987. p. 25-28.

DIEMER, F. **Caracterização da resistência de um solo tropical a partir do ensaio de penetração dinâmica com energia variável (PANDA)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. Goiânia, p. 223. 2014.

FEUERHARMEL, C. **Estudo da resistência ao cisalhamento e da condutividade hidráulica de solos coluvionares não saturados da Formação Serra Geral**. Tese (doutorado)-Programa de pós graduação engenharia civil. Porto Alegre, RS, p. 329 p. 2007.

FREDLUND , D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soil. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, 1977.

FREDLUND , D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDNER, R. A. The shear strenght of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical journal**, 1978. p. 313-321.

FREDLUND , D. G.; RAHARDJO, H. Non-linearity of strenght envelope for unsaturated soils. In: 6th International Conference on Expansive Soils, New Delhi. **Proceedings**., p. p. 49-59, 1987.

FREDLUND , D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994. p. 521-532.

FREDLUND, D. G. **Volume change behavior of unsaturated soils**. Tese (doutorado) - University of Alberta. Alberta. 1973.

FREDLUND, D. G. The emergence of unsaturated soil mechanics. **The Fourth Spencer J. Buchanan Lecture**, College Station, p. 39, Novembro 1996.

FREDLUND, D. G. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, 2006.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. USA: Jonh Wiley and Sons, 1993.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated Soils**. USA: Jonh Wiley and Sons, 2012.

FREDLUND, D. G.; VANAPALLI, S. K. **Shear Strenght of unsaturated soils. Methods of soil analysis, part 4 - physical methods.** [S.l.]: J. H. Dane e G.C, 2002. p. 324-360 p.

FREITAS, N. O. **Resistência ao cisalhamento de um solo não saturado com medida direta de sucção.** Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Departamento de Geotecnia-Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo. São Carlos. 2008.

GAN, J. K.; FREDLUND, D. G. Shear strenght characteristic of two saprolitic soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, p. 381-386, 1996.

GARDNER, R. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. **Soil Science**, v. 43, p. 277-283, January 1937.

GEORGETTI, G. B. **Resistência de um solo não saturado a partir de ensaios com teor de umidade constante.** Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010.

GREACEN, E. L.; WALKER, G. R.; COOK, P. G. Evaluation of the filter paper method for measuring soil water suction. In: Internacional Conference on Measurement of soil and Plat water Status. **Proceedings**, 1987. 137-143.

GUIZELINI, A. P. **Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários.** Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná - Setor de tecnologia - Programa de Pós graduação em Construção civil. Curitiba, p. 166. 2011.

GULHATI, S. K.; SATIJA, B. S. Shear Strenght of Partially Saturated Soils. In: 10th Int. Conf. soil mechanics. **Anais**, Stockholm, 1981.

HANSEN, H. C. The water-retainging power of the soil. **The journal of ecology**, v. 14, p. 111-119, 1926.

HILF, J. W. **An investigation of pore-water pressures in compacted cohesive soil.** Ph.D Thesis. Denver, Colorado. 1956.

HILLEL, D. **Soil and water:** Physical Principles and processes. Londres: Academic Press. 1971. p. 29-77.

HO, D. Y. F.; FREDLUND , D. G. Increase in strenght due to suction fot two Hong kong soils. In: ASCE Conference on engineering and construction in tropical and residual soil. **Anais**, Honolulu, Hawai, 1982.

JENNINGS, J. E. B.; BURLAND, J. B. Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils. **Geotechnique**, 1962. p. 125-144.

LEONG, E. C.; HE, L.; RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, p. 322-333, 2002.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: 5º congresso brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia de Fundações. **Proceedings**, 1994. 515-522.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. Anais do 3º Simposio Brasileiro de solos não saturados. **Anais**, Rio de Janeiro, 1997. 373-397.

MARINHO, F. A. M. **Os Solos não saturados : Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados**. Texto apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 201. 2005.

MARINHO, F. A. M.; PEREIRA, J. H. F. Mini-curso de solos não saturados In: 11º congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia geotécnica. **Apostila do 11º congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e engenharia Geotécnica**, Brasília: ABMS, 1998.

MENDES, R. M. **Estudo das Propriedades Geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP)**. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 236. 2008.

MENEZES, M. B. **Determinação da curva de retenção em solos utilizando bomba de fluxo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2013.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Ampliação do uso da metodologia MCT no estudo de solos tropicais para pavimentação. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. **Proceedings**., Belo Horizonte, 1994. 185-209.

OLIVEIRA, O. M. **Estudo sobre a resistência ao cisalhamento de um solo residual compactado não saturado**. tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia e Estruturas e Fundações. São Paulo. 2004.

OLIVEIRA, O. M. **Anotações de aula**. [S.l.]: [s.n.], 2015.

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. **Análise dos Parâmetros das Equações de Ajuste da Curva de Retenção de Água Propostas por Fredlund**

e Xing (1994) e Van Genutchen (1980). VII Simpósio Brasileiro dos Solos Não Saturados. Fortaleza: [s.n.]. 2015. p. 86-92.

OLIVEIRA, O. M.; MARINHO, F. A. M. **Análise dos Parâmetros das equações de ajuste da curva de retenção de águas propostas po Fredlund e Xing (1994) e Van Genutchen**. VIII Simpósio Brasileiro de solos não saturados. Fortaleza: ABMS. 2015.

PECAPEDRA, L. L. **Estudo da Resistência ao Cisalhamento não saturada de solos residuais de Granito e Diabásio de Florianópolis (SC)**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Catarina-Centro Tecnológico-Programa de pós graduação em engenharia civil. Florianópolis, p. 170. 2015.

PEREIRA, A. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados: análise experimental e teórica**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do sul. Porto Alegre, p. 153. 2006.

PEREIRA, A. **Comportamento mecânico saturado e não saturado de um solo coluvionar de arenito**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 305. 2013.

RAHARDJO, H. et al. Shear-strenght characteristics of residual soil. **Canadian Geotech.**, p. 60-77, 1994.

RAHARDJO, H.; CHANG, F. M.; LIM, T. T. Shear Strenght in situ matric suction of residual soil. In: 1º International conference on unsaturated soils. **Proc. of the 1 internacional conference on unsaturated soils**, Paris, France, 2, 1995. p. 637-643.

RASSAM, D. W.; COOK, F. Predicting the shear strength envelope of unsaturated soils. **Geotechnical Testing Journal**, v. 25, p. 215-220, 2002.

ROCHA, M. F. **Influência do perfil de sucção em obras de contenção em solos não saturados**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil. Goiânia, p. 271. 2013.

ROHM, S. A. **Resistência ao cisalhamento de um solo arenoso laterizado não saturadoda região de São Carlos**. Tese (Doutorado)-Escola de São Carlos-Universidade de São Paulo. São Carlos. 1993.

ROHM, S. A.; VILAR, O. M. Shear Strenght of an Unsaturated Sandy Soils. **Proceedings Unsaturated Soils**, Paris, 1995. 189-193.

SANTOS, G. T. **Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Programa de Pós-

graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PGEM. Porto Alegre. 1997.

SANTOS, O. G. et al. **Estudo Comparativo de curvas características de areias obtidas por métodos de previsão e medição direta**. VIII Simpósio Brasileiro de Solos não saturados. Fortaleza, Ceará: [s.n.]. 2015. p. 37-44.

SEVERO, R. N. F. et al. Estudo das condições de estabilidade das falésias na área onde está instalado um resort no Município de Tibau do sul - RN. In: **8º Simpósio Brasileiro de solos não saturados**, Fortaleza, 2015. 388-395.

SHULL, C. A. Measurement of the surface forces in soils. **The Botanical Gazette**, v. LXII, p. 1-31, 1916.

SOARES, R. M.; CAMPOS, T. M. P. Resistência ao cisalhamento de um solo coluvionar não saturado da Cidade do Rio de Janeiro. In: IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. **Anais**, Salvador, 2005. 165-172.

SOONKIE, N. et al. Determination of the shear strength of unsaturated soils using the multistage direct shear test. **Engineering Geology**, p. 272-280, 2011.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. Tese (Doutorado) - Departamento de Geotecnia - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2004.

TERZAGHI, K. The shear resistance of saturated soils. In: international conference of soil Mechanics. **Proceedings.**, Cambridge, MA, 1936.

TOMAZZOLLI, E. R.; PELLERIN, J. M. Unidades do mapa geotécnico da ilha de Santa Catarina: as rochas. **Geosul**, Florianópolis, v. 30, p. 225-247, julho 2015.
VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 1980. p. 892-898.

VANAPALLI, S. K. et al. Suction and storage characteristic of unsaturated soils. In: 3rd International Conference on Unsaturated Soils. **Proceedings**, Recife (Brasil), 2004.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The relationship between the soil-water characteristic curve and unsaturated shear strength of a compacted glacial till. **Geotechnical Testing Journal**, v. 19(3), 1996.

VANAPALLI, S. K.; FREDLUND, D. G.; PUFAIL, D. E. The influence of soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of Compacted Till. **Geotechnique**, v. 49, p. 143-159, 1999.

VILAR, L. F. S.; CAMPOS, T. M. P. Obtenção de uma curva característica de sucção pelo uso de diversas técnicas. In: IV Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. **Anais.**, Porto Alegre: ABMS, 2001. 337-353.

VILAR, O. M. **Introdução à mecânica dos solos não saturados**. Notas de aula da disciplina de resistência ao cisalhamento dos solos-Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos. 2006.

WILSON, G. W. **Soil Evaporative Fluxes for Geotechnical Engineering Problems**. (Tese de pós doutorado) - University of Saskatchewan. Saskatoon, Canada. 1990.

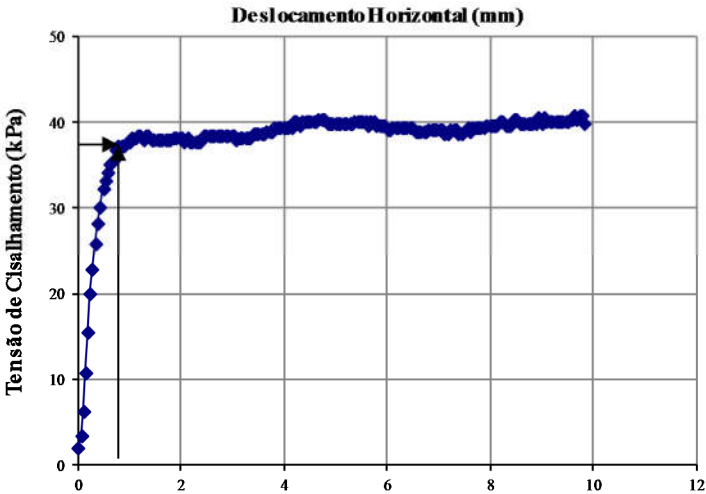
YONG, R. N.; SIU, S. K. H.; SCIADAS, N. Stability analysis of unsaturated soil slopes. Engineering and construction in tropical and residual soils. **ASCE Geotechnical Division Special Conference**, Honolulu, Hawai, 1982. 483-499.

APÊNDICE A

O Apêndice B são os resultados detalhados das sucções obtidas dos moldes metálicos indeformados do solo residual de diabásio, pelo método do item 4.2.3. Além disso, cada molde tem o gráfico deformação *versus* tensão cisalhante, mostrando o ponto de escolha de ruptura.

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 1 - inundado

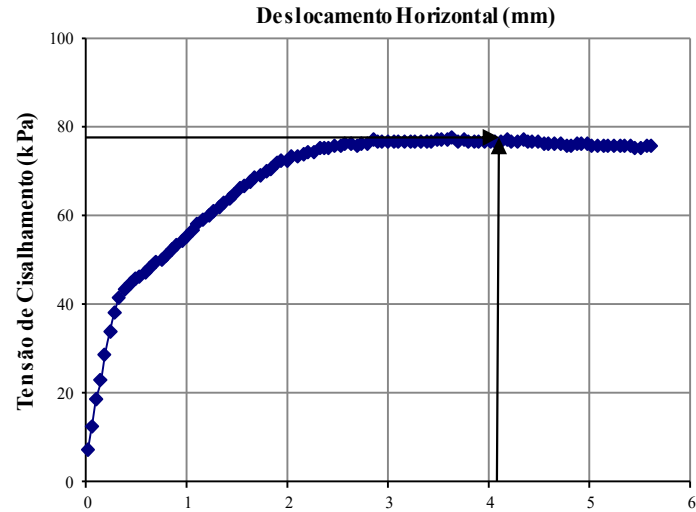
Condição	V (cm ³)	Massa úmida final (g)	pw (g/cm ³)	pw campo (g/cm ³)	pd umidade campo(g/ cm ³)	pd umidade amolgad a(g/cm ³)	e campo (su)	e amolgad o (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ (%) Ps natural	Θ (%) Ps amolgado
Inundado	197,4	340,41	1,72435	1,73646	1,22563	1,1597	1,359	1,493	88,68	94,29	48,6953	41,678	49,87174	56,469647



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 1,3 mm
Tensão cisalhante: 37,82 kPa
Tensão normal líquida: 51,05 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 2 - inundado

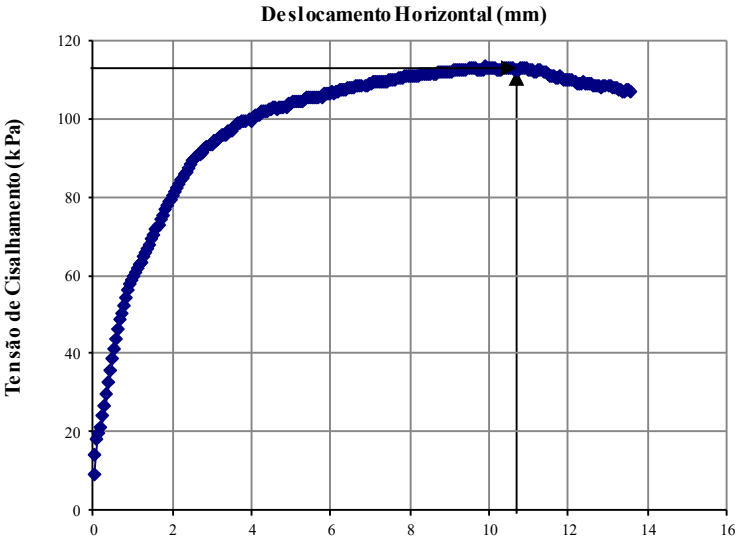
Condição	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pw campo (g/cm³)	pd umidade campo (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e campo (su)	e amolgada (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ Ps natural (%)	Θ Ps amolgada (%)
Inundado	200,1	337,9	1,68899	1,68899	1,21343	1,1087	1,383	1,6076	81,95	94,13	52,3426	39,192	47,55611	58,031066



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4,1 mm
Tensão cisalhante: 76,91 kPa
Tensão normal líquida: 104,67 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 3

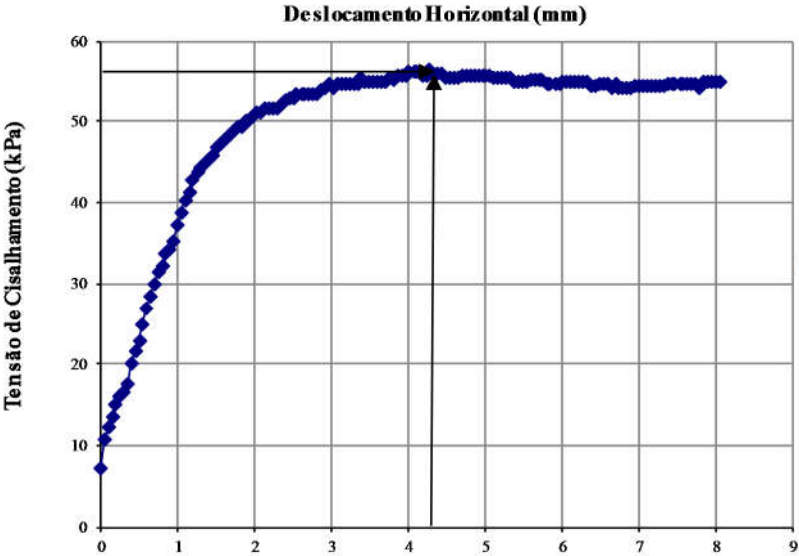
Condição	V (cm³)	Massa úmida final (g)	ρw (g/cm³)	ρw campo (g/cm³)	pd umidade campo (g/cm³)	pd umidade amolgada a (g/cm³)	e campo (su)	e amolgada o (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ Psnatural (%)	Θ Psamolgada (%)
Inundado	204,1	358,54	1,75694	1,77046	1,18699	1,1677	1,436	1,4757	98,99	98,8464	50,4572	49,1557	56,99476	58,920393



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 10,79 mm
Tensão cisalhante: 112,63 kPa
Tensão normal líquida: 168,57 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 4

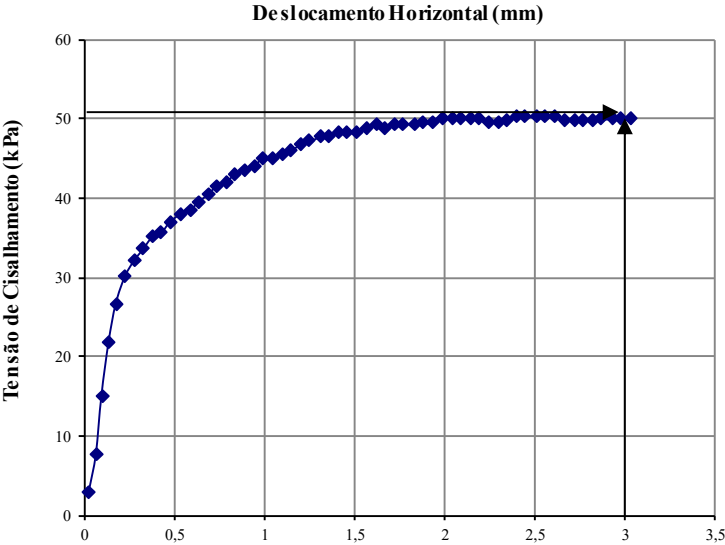
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida final (g)	pw (g/cm³)	pw campo (g/cm³)	pd umidade campo (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e campo (su)	e amolgado (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada(%))	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ Ps natural (%)	Θ Psamolgada (%)
1	204,8	0,45178	0,44468	44,823	115,073	350,23	1,71	1,7154	1,20288	1,21951	1,4034	1,37063	87,77	84,920502	40,260917	42,6061	50,761604	49,0985395



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4,33 mm
Tensão cisalhante: 55,78 kPa
Tensão normal líquida: 52,69 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 115,073 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 5

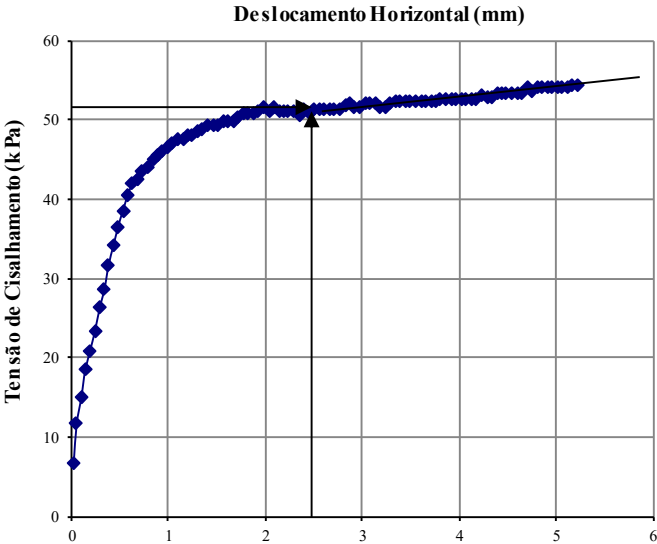
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	ρ_w (g/cm³)	ρ_w campo (g/cm³)	pd umidade campo (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e campo (su)	e amolgado (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada(%) (%)	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ Psnatural (%)	Θ Psamolgada (%)
1	204,1	0,46185	0,46999	46,592	89,3914	357,5	1,752	1,7616	1,23532	1,25635	1,34029	1,30111	91,90	87,630977	39,438833	42,6061	51,652089	49,5489545



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 3,02 mm
Tensão cisalhante: 49,99 kPa
Tensão normal líquida: 51,95 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 89,39 kPa

Análise de Sucção - Resisual de diabásio - solo 6

Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pw campo (g/cm³)	pd umidade campo (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada(%))	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ Pscampo (%)
1	207	0,51673	0,52264	51,9684	62,3686	348,7	1,684	1,6939	1,21237	1,25097	1,38459	1,31101	82,93	76,372499	34,633511	39,7167	49,641671



Densidade real dos grãos:2,891 su

deslocamento horizontal:2,5 mm

Tensão cisalhante:51,24 kPa

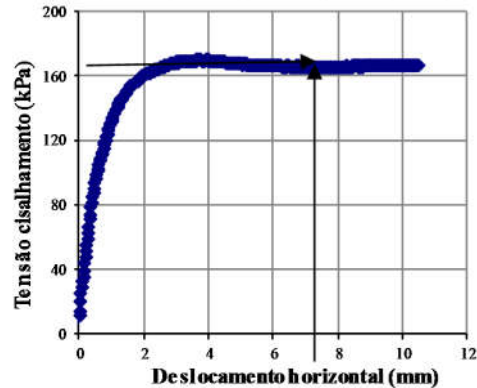
Tensão normal líquida:51,7 kPa

velocidade:0,307 mm/seg

Sucção:62,2686 kPa

Análise de Sucção - Resisual de diabásio - solo 7

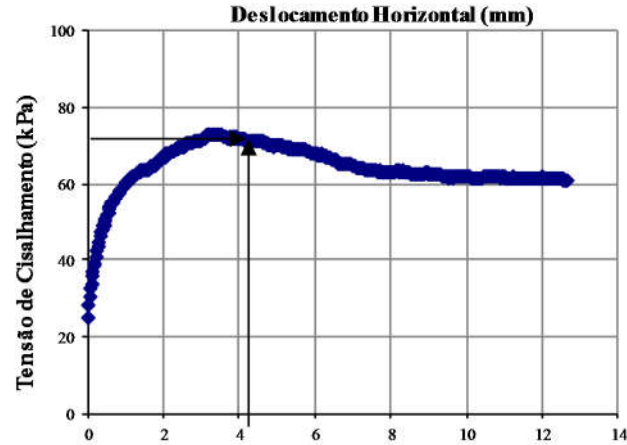
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	200,1	0,71327	1,42251	106,789	10,4533	355,02	1,775	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	95,54	94,52543	44,016882	45,04263	55,1086	54,23718
2	200,1	0,77056	0,73608	75,3315	24,8369	352,94	1,764	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	93,74	92,71345	43,173112	44,192851	54,0689	53,197495
3	200,1	0,86179	0,82971	84,5747	18,6399	351,09	1,755	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	92,14	91,10183	42,422644	43,437038	53,1442	52,272776
4	200,1	0,73351	0,7108	72,2156	27,5801	349,36	1,746	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	90,64	89,59475	41,720855	42,73025	52,2794	51,408038
5	200,1	0,64788	0,64388	64,5879	36,3768	347,89	1,739	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	89,36	88,31417	41,124537	42,129685	51,5447	50,67326
6	200,1	0,53931	0,5579	54,8606	54,5298	345,96	1,729	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	87,69	86,63287	40,341616	41,341187	50,58	49,708553
7	200,1	0,87494	0,4728	67,3873	32,7436	344,67	1,723	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	86,57	85,50909	39,818316	40,814161	49,9352	49,063748
8	200,1	0,46704	0,4776	47,2321	79,0482	342,2	1,71	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	84,43	83,35736	38,81634	39,805048	48,7005	47,829122
9	200,1	0,43625	0,42618	43,1217	146,707	340,66	1,703	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	83,10	82,0158	38,191626	39,175884	47,9308	47,059356
10	200,1	0,47602	0,46455	47,0287	83,989	339,59	1,697	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	82,17	81,08368	37,757571	38,738738	47,3959	46,524518
11	200,1	0,40696	0,40686	40,6907	207,575	337,64	1,688	1,2235	1,23219	1,36294	1,34623	80,48	79,38495	36,966537	37,94207	46,4212	45,549813



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 7,55 mm
Tensão cisalhante: 165,45 kPa
Tensão normal líquida: 223,35 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 207,575 kPa

Análise de Sucção - Residual de diábasio - solo 8

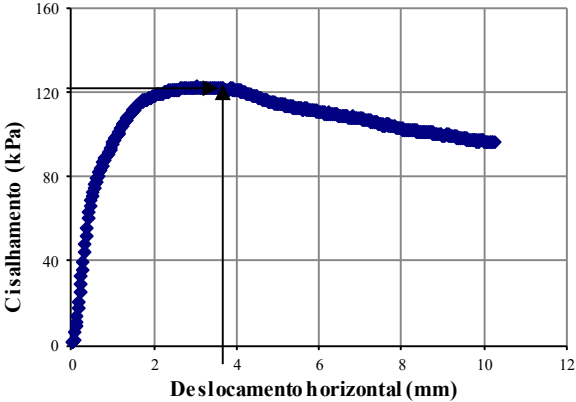
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada((%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	200,3	0,98099	0,98698	98,3986	12,8052	344,07	1,718	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	85,73	87,94012	42,591798	40,458604	49,472	51,301307
2	200,3	0,6573	0,67419	66,5744	33,7441	342,44	1,709	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	84,32	86,54537	41,916282	39,793194	48,6584	50,487657
3	200,3	0,29625	0,76212	52,9184	59,6286	340,54	1,7	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	82,68	84,91959	41,128872	39,017563	47,7099	49,53923
4	200,3	0,6536	0,64915	65,1374	35,6206	339,32	1,694	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	81,63	83,87567	40,623271	38,519526	47,1009	48,93024
5	200,3	0,58846	0,5687	57,8577	47,7909	338,09	1,688	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	80,56	82,82319	40,113526	38,017407	46,487	48,316259
6	200,3	0,47338	0,47895	47,6163	77,4757	336,2	1,678	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	78,93	81,20596	39,33026	37,245859	45,5435	47,372824
7	200,3	0,45086	0,44698	44,892	113,946	335,05	1,672	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	77,93	80,22194	38,853669	36,776398	44,9695	46,798776
8	200,3	0,46704	0,4776	47,2321	79,0482	334,1	1,668	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	77,11	79,40904	38,459964	36,388582	44,4953	46,324563
9	200,3	0,41516	0,41357	41,4363	186,615	332,53	1,66	1,2228	1,20449	1,36428	1,40019	75,75	78,06563	37,809314	35,747666	43,7116	45,540863



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4,1 mm
Tensão cisalhante: 76,91 kPa
Tensão normal líquida: 104,67 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 186,615 kPa

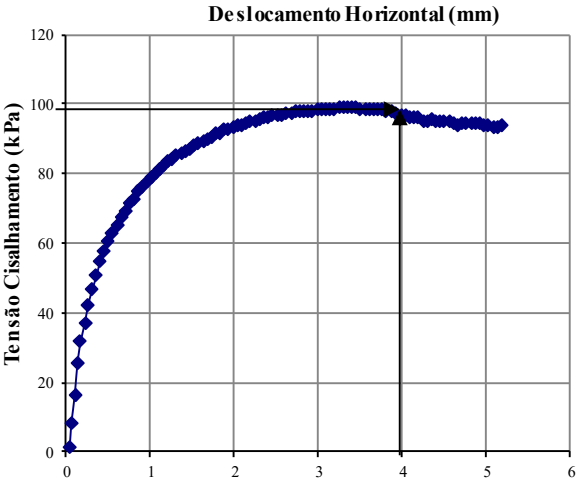
Análise de Sucção - Resisual de diabásio - solo 9

Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	198,2	1,04266	1,06107	105,186	10,8528	333,28	1,682	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	82,79	85,50781	43,2634	40,556544	48,5263	50,78701
2	198,2	0,75533	0,72527	74,03	25,9339	331,39	1,672	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	81,16	83,90208	42,450966	39,759461	47,5726	49,833293
3	198,2	0,73941	0,73096	73,5185	26,3838	329,96	1,665	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	79,93	82,68716	41,836268	39,156377	46,851	49,111697
4	198,2	0,76477	0,75093	75,7848	24,4701	328,49	1,658	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	78,67	81,43825	41,204375	38,536424	46,1092	48,369917
5	198,2	0,65987	0,65098	65,5423	35,0773	327,14	1,651	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	77,51	80,2913	40,624065	37,967079	45,428	47,68869
6	198,2	0,54271	0,54911	54,5908	55,2007	325,32	1,642	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	75,94	78,74504	39,841722	37,199517	44,5096	46,770295
7	198,2	0,49446	0,48933	49,1894	71,4758	324,35	1,637	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	75,10	77,92094	39,424759	36,790432	44,0201	46,280821
8	198,2	0,55499	0,53188	54,3436	55,8254	323,25	1,631	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	74,16	76,98639	38,951914	36,326521	43,465	45,725747
9	198,2	0,41816	0,43089	42,4524	161,417	319,9	1,614	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	71,27	74,14025	37,511886	34,913702	41,7746	44,035295
10	198,2	0,44945	0,43353	44,1492	126,693	318,42	1,607	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	70,00	72,88285	36,875695	34,289531	41,0278	43,288469
11	198,2	0,37539	0,36931	37,2349	339,964	316,39	1,597	1,1965	1,1739	1,41619	1,46273	68,25	71,15817	36,003081	33,433405	40,0034	42,264105



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 3,87 mm
Tensão cisalhante: 121,7 kPa
Tensão normal líquida: 104,46 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 339,964 kPa

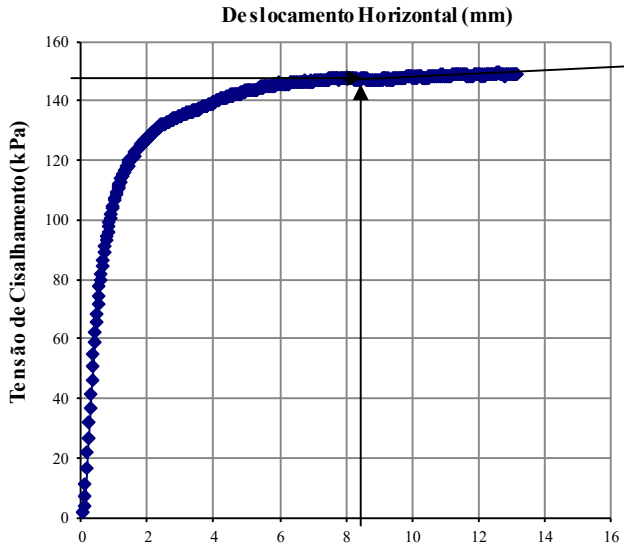
Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 10																	
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	198,5	0,91597	0,90913	91,2551	15,437	348,51	1,756	1,2257	1,2259	1,35871	1,35827	92,08	92,05632	43,250527	43,277275	53,0437	53,020777
2	198,5	0,60342	0,61079	60,7107	42,4134	345,96	1,743	1,2257	1,2259	1,35871	1,35827	89,85	89,8254	42,202383	42,228934	51,7587	51,735858
3	198,5	0,44945	0,43353	44,1492	126,693	344,25	1,735	1,2257	1,2259	1,35871	1,35827	88,36	88,32937	41,499509	41,52593	50,8971	50,874206



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4 mm
Tensão cisalhante: 97,04 kPa
Tensão normal líquida: 104,55 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 126,693 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 11 - inundado

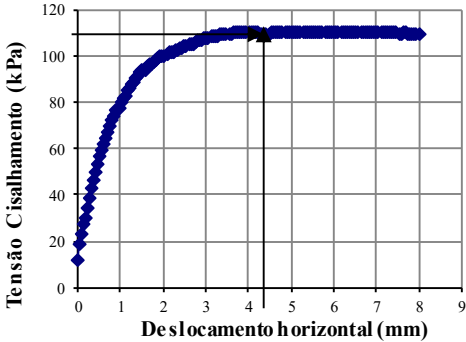
Condição	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρ_w (g/cm³)	ρ_w campo (g/cm³)	ρ_d campo (g/cm³)	ρ_d amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgada (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ campo (%)	Θ amolgada (%)
Inundado	197,7	336,66	1,70309	1,64001	1,18913	x	1,431	x	76,59	x	x	37,9165	51,39597	x



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 8,62 mm
Tensão cisalhante: 146,99 kPa
Tensão normal líquida: 208,38 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 12

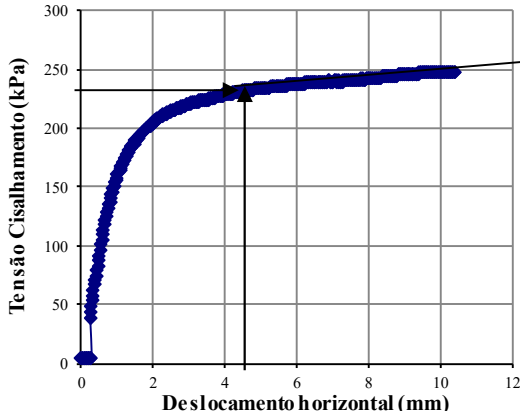
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	189,7	0,93703	0,98192	95,9475	13,6319	306,53	1,616	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	84,04	83,83782	47,536067	47,770291	52,245	52,071416
2	189,7	0,90135	0,88129	89,132	16,365	304,22	1,604	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	82,08	81,87692	46,42424	46,656699	51,0271	50,853511
3	189,7	0,73385	0,70638	72,0116	27,7743	301,89	1,592	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	80,10	79,89905	45,302787	45,533466	49,7987	49,625062
4	189,7	0,84067	0,83803	83,9349	18,9942	300,36	1,584	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	78,80	78,60028	44,566382	44,795892	48,992	48,818397
5	189,7	0,74467	0,75073	74,7696	25,3024	298,81	1,575	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	77,49	77,28453	43,820351	44,048676	48,1748	48,001189
6	189,7	0,63371	0,62783	63,0768	38,5765	296,83	1,565	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	75,81	75,60376	42,867357	43,094169	47,1309	46,95727
7	189,7	0,6125	0,61109	61,1796	41,6117	295,6	1,558	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	74,77	74,55965	42,275345	42,501217	46,4824	46,308775
8	189,7	0,58293	0,58162	58,2273	47,0421	292,91	1,544	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	72,49	72,27619	40,98062	41,204437	45,0642	44,890523
9	189,7	0,45782	0,47334	46,5579	89,8276	289,63	1,527	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	69,70	69,49189	39,401922	39,623232	43,3348	43,161203
10	189,7	0,47271	0,46929	47,0999	83,1392	287,48	1,516	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	67,88	67,66682	38,367105	38,586772	42,2013	42,027656
11	189,7	0,48479	0,32966	40,7225	206,635	285,37	1,505	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	66,09	65,8757	37,35154	37,569595	41,0888	40,915197
12	189,7	0,40779	0,41252	41,0152	198,178	284,44	1,5	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	65,30	65,08625	36,903921	37,121266	40,5985	40,424872
13	189,7	0,40772	0,39497	40,1347	224,723	282,06	1,487	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	63,28	63,06593	35,758402	35,973929	39,3437	39,170061
14	189,7	0,36523	0,35431	35,9768	406,854	278,53	1,468	1,0937	1,09541	1,64339	1,6392	60,29	60,06942	34,059377	34,272206	37,4826	37,308934



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4,5 mm
Tensão cisalhante: 109,77 kPa
Tensão normal líquida: 105,12 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 406,854 kPa

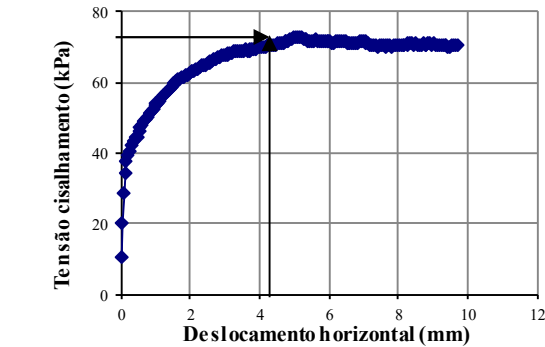
Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 13

Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	197,3	1,20593	1,19974	120,283	7,78198	342,6	1,736	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	93,39	93,82747	46,95707	46,486936	55,1018	55,481011
2	197,3	0,91867	0,90356	91,1111	15,4976	340,54	1,726	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	91,62	92,06184	46,07344	45,606133	54,0578	54,436979
3	197,3	0,89939	0,92271	91,1052	15,5	338,98	1,718	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	90,28	90,72477	45,404283	44,939118	53,2672	53,646353
4	197,3	0,84015	0,84769	84,3922	18,74	337,25	1,709	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	88,80	89,24198	44,662206	44,199414	52,3904	52,769569
5	197,3	0,77665	0,70376	74,0209	25,9419	335,66	1,701	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	87,43	87,87919	43,980181	43,519571	51,5845	51,963739
6	197,3	0,63097	0,60809	61,9527	40,3357	333,63	1,691	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	85,69	86,13927	43,10942	42,651595	50,5557	50,934911
7	197,3	0,55074	0,58978	57,0262	49,5377	332,01	1,683	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	84,30	84,75077	42,414526	41,958925	49,7347	50,113876
8	197,3	0,56086	0,5306	54,573	55,2453	329,22	1,669	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	81,90	82,35946	41,217766	40,765993	48,3207	48,699872
9	197,3	0,48275	0,48114	48,1941	75,1927	325,76	1,651	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	78,93	79,39389	39,733611	39,286586	46,5671	46,946304
10	197,3	0,43168	0,42505	42,8365	152,805	323,7	1,641	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	77,16	77,62826	38,849981	38,405783	45,5231	45,902272
11	197,3	0,40867	0,4058	40,7236	206,603	321,32	1,628	1,1853	1,18153	1,43901	1,44684	75,11	75,58836	37,829088	37,388156	44,3169	44,696061



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4,7 mm
Tensão cisalhante: 232,95 kPa
Tensão normal líquida: 310,09 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 206,603 kPa

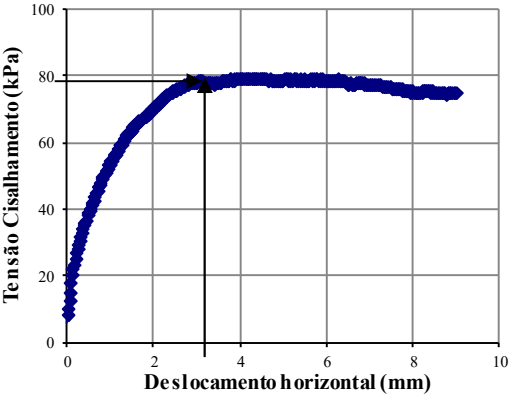
Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 14																	
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgada (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	203,2	1,24644	1,2323	123,937	7,2254	338,67	1,666	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	86,64	86,89513	46,159626	45,881114	52,4092	52,626843
2	203,2	0,97496	0,95978	96,7368	13,3577	336,35	1,655	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	84,76	85,0103	45,158385	44,881781	51,2677	51,485322
3	203,2	0,98175	0,9967	98,9224	12,6377	334,67	1,647	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	83,39	83,64542	44,433348	44,158126	50,441	50,658704
4	203,2	0,91432	0,89577	90,5045	15,7564	333,17	1,639	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	82,17	82,42678	43,785994	43,512005	49,703	49,920652
5	203,2	0,81309	0,81231	81,2702	20,5764	331,75	1,632	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	81,01	81,27314	43,173166	42,900344	49,0043	49,221963
6	203,2	0,67066	0,66032	66,549	33,776	329,64	1,622	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	79,30	79,55892	42,262554	41,991468	47,9661	48,183769
7	203,2	0,59792	0,60034	59,9133	43,827	328,27	1,615	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	78,18	78,4459	41,671304	41,401344	47,292	47,509682
8	203,2	0,53184	0,5398	53,5818	57,8146	325,69	1,603	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	76,09	76,34984	40,557855	40,290017	46,0226	46,240232
9	203,2	0,47848	0,46203	47,0252	84,0307	322,64	1,588	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	73,60	73,87194	39,241568	38,976238	44,5219	44,739527
10	203,2	0,43948	0,44628	44,2884	124,199	320,74	1,578	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	72,06	72,32833	38,421586	38,157819	43,587	43,804661
11	203,2	0,43107	0,4242	42,7639	154,397	318,84	1,569	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	70,51	70,78472	37,601604	37,339399	42,6521	42,869795
12	203,2	0,40643	0,39508	40,0757	226,625	318,17	1,566	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	69,97	70,24039	37,312452	37,050799	42,3225	42,540131
13	203,2	0,40947	0,39188	40,0672	226,901	315,81	1,554	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	68,05	68,32307	36,293949	36,034236	41,1613	41,37893
14	203,2	0,25034	0,21148	23,0912	2560,63	311,06	1,531	1,1423	1,14011	1,5309	1,53573	64,18	64,46404	34,243994	33,988187	38,8241	39,041765



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4,37 mm
Tensão cisalhante: 70,52 kPa
Tensão normal líquida: 52,72 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 2560,63 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabasio - solo 15

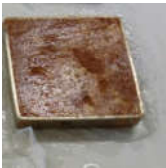
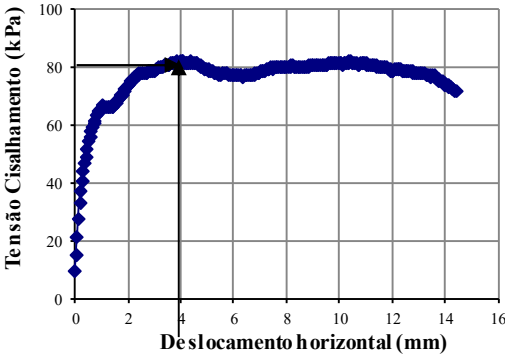
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	pd umidad e natural	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturaçã o natural (%)	Saturaçã o amolgada(%)	W umidade amolgada (%)	W umidade nat (%)	Θ umidade natural (%)	Θ umidade amolgada (%)
1	197,4	1,11982	1,14561	113,272	9,03191	330,78	1,676	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	86,16	86,16163	44,503836	44,497567	51,5986	51,603629
2	197,4	0,76825	0,79445	78,135	22,6852	328,77	1,665	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	84,46	84,46162	43,625751	43,619521	50,5804	50,585462
3	197,4	0,81408	0,79853	80,6305	20,9837	326,88	1,656	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	82,86	82,86309	42,80009	42,793895	49,6231	49,628081
4	197,4	0,70676	0,68678	69,6769	30,1398	325,29	1,648	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	81,51	81,51831	42,105486	42,099321	48,8176	48,822665
5	197,4	0,6151	0,59683	60,5966	42,6116	323,94	1,641	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	80,37	80,37651	41,515728	41,509589	48,1338	48,138822
6	197,4	0,53564	0,53627	53,5956	57,7776	322	1,631	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	78,73	78,7357	40,668224	40,662121	47,1511	47,156114
7	197,4	0,50696	0,50849	50,7728	66,0746	320,3	1,622	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	77,29	77,29787	39,925566	39,919495	46,2899	46,294977
8	197,4	0,51971	0,51636	51,8038	62,8613	319,15	1,617	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	76,32	76,32523	39,423179	39,417131	45,7074	45,712444
9	197,4	0,42034	0,44537	43,2857	143,314	315,97	1,601	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	73,63	73,63565	38,033971	38,027983	44,0966	44,101613
10	197,4	0,24279	0,55919	40,0989	225,874	314,17	1,591	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	72,11	72,11325	37,247627	37,241673	43,1848	43,189822
11	197,4	0,37662	0,37762	37,712	317,584	311,06	1,576	1,1596	1,15953	1,49314	1,49325	69,48	69,48288	35,888999	35,883104	41,6094	41,614449



- Densidade real dos grãos: 2,891 su
- deslocamento horizontal: 3,5 mm
- Tensão cisalhante: 77,92 kPa
- Tensão normal líquida: 52,24 kPa
- velocidade: 0,307 mm/seg
- Sucção: 317,584 kPa

Análise de Sucção - Resisul de diabásio - solo 16

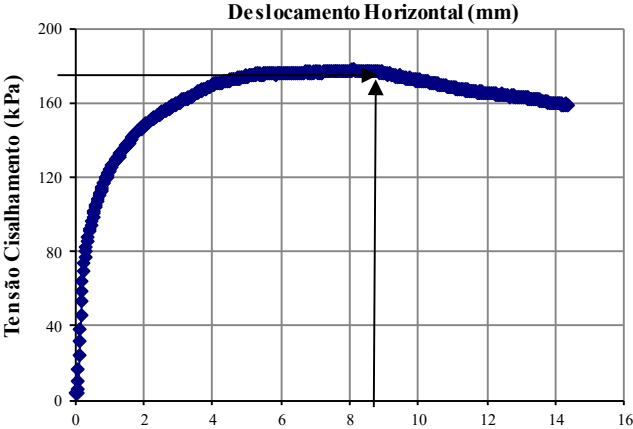
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	212,6	1,20776	1,21534	121,155	7,64388	340,69	1,603	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	78,81	77,65759	41,900818	43,128906	48,29	47,320982
2	212,6	0,81051	0,83104	82,0773	20,0783	338,23	1,591	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	76,93	75,75861	40,876203	42,095424	47,1328	46,163826
3	212,6	0,7784	0,78264	78,0517	22,7453	336,27	1,582	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	75,42	74,24559	40,059843	41,271999	46,2109	45,241864
4	212,6	0,76127	0,75176	75,6513	24,5773	334,78	1,575	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	74,28	73,09539	39,439243	40,646028	45,51	44,540985
5	212,6	0,60106	0,62217	61,1619	41,6416	333,38	1,568	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	73,20	72,01467	38,856129	40,057867	44,8515	43,882441
6	212,6	0,50018	0,49961	49,9896	68,6718	331,46	1,559	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	71,73	70,53253	38,05643	39,251247	43,9483	42,979295
7	212,6	0,46458	0,45195	45,8262	99,7179	329,86	1,552	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	70,50	69,29742	37,390013	38,579063	43,1957	42,226673
8	212,6	0,50248	0,25034	37,6408	320,828	328,08	1,543	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	69,13	67,92335	36,648626	37,831259	42,3584	41,389382
9	212,6	0,39496	0,38436	38,9661	265,522	326,61	1,536	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	68,00	66,78859	36,036356	37,21369	41,6669	40,697911
10	212,6	0,44589	0,42404	43,4965	139,064	325,45	1,531	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	67,11	65,89314	35,553204	36,726357	41,1213	40,15226
11	212,6	0,35847	0,36444	36,1454	397,18	323,43	1,521	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	65,56	64,33381	34,711854	35,877725	40,1711	39,202075
12	212,6	0,37132	0,35184	36,1581	396,46	322,72	1,518	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	65,02	63,78572	34,416132	35,579444	39,8371	38,868099
13	212,6	0,35539	0,35534	35,5366	433,242	321,39	1,512	1,1197	1,12936	1,58202	1,55986	64,00	62,75904	33,862173	35,020691	39,2115	38,242482



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4 mm
Tensão cisalhante: 81,87 kPa
Tensão normal líquida: 52,52 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 433,242 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 17

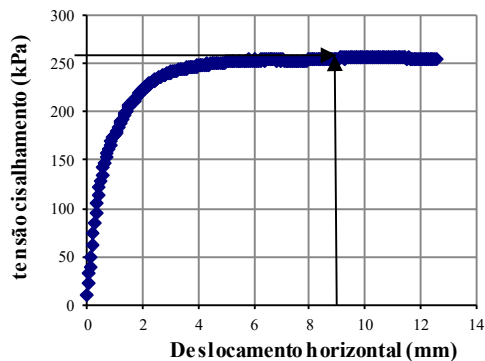
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada((%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	201,5	1,12033	1,12457	112,245	9,23821	335,41	1,664	1,1522	1,15509	1,50903	1,50282	85,15	84,81165	44,087522	44,444551	51,2108	50,925274
2	201,5	0,5984	0,6262	61,23	41,5269	333,19	1,653	1,1522	1,15509	1,50903	1,50282	83,32	82,97704	43,13384	43,488506	50,1092	49,823681
3	201,5	0,64316	0,61388	62,8521	38,9194	331,62	1,646	1,1522	1,15509	1,50903	1,50282	82,02	81,67959	42,45939	42,812385	49,3301	49,044627
4	201,5	0,57273	0,54634	55,9538	51,9258	330,15	1,638	1,1522	1,15509	1,50903	1,50282	80,81	80,46479	41,827898	42,179328	48,6007	48,315194
5	201,5	0,48384	0,49928	49,1559	71,5967	328,9	1,632	1,1522	1,15509	1,50903	1,50282	79,78	79,43179	41,290915	41,641015	47,9804	47,694928
6	201,5	0,46294	0,45925	46,1095	95,7656	327,09	1,623	1,1522	1,15509	1,50903	1,50282	78,28	77,936	40,513364	40,861537	47,0823	46,796783



- Densidade real dos grãos: 2,891 su
- deslocamento horizontal: 12,1 mm
- Tensão cisalhante: 164,62 kPa
- Tensão normal líquida: 213,13 kPa
- velocidade: 0,307 mm/seg
- Sucção: 95,7656 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 18

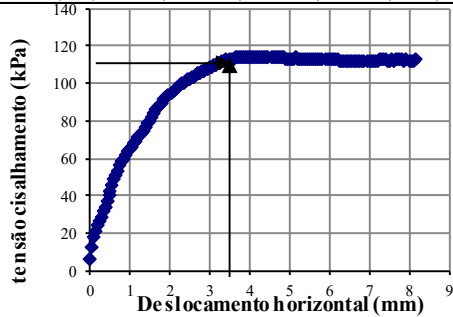
Tentativa (semana)	V (cm ³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm ³)	pd umidade natural (g/cm ³)	pd umidade amolgada (g/cm ³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	198,4	1,20128	1,20193	120,161	7,80173	317,37	1,6	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	80,41	81,7152	46,637281	45,135814	49,7504	50,879035
2	198,4	0,79788	0,81101	80,4445	21,1042	314,49	1,585	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	78,06	79,38367	45,306609	43,818767	48,2987	49,427335
3	198,4	0,72003	0,73031	72,5171	27,2965	313,13	1,578	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	76,95	78,28268	44,678237	43,196828	47,6132	48,741811
4	198,4	0,75611	0,75996	75,8033	24,4553	311,63	1,571	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	75,73	77,06834	43,985178	42,510866	46,8571	47,985717
5	198,4	0,65532	0,65337	65,4346	35,2207	310,1	1,563	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	74,48	75,82971	43,278259	41,811185	46,0859	47,214502
6	198,4	0,55064	0,55378	55,2212	53,651	308,33	1,554	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	73,04	74,39679	42,46045	41,00175	45,1937	46,322312
7	198,4	0,51679	0,52289	51,9839	62,3225	307,4	1,549	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	72,28	73,64391	42,030754	40,576454	44,7249	45,853534
8	198,4	0,56183	0,56867	56,5251	50,634	306,36	1,544	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	71,44	72,80197	41,550233	40,100854	44,2007	45,329309
9	198,4	0,46091	0,45319	45,7048	101,462	303,23	1,528	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	68,89	70,26805	40,104052	38,66948	42,623	43,751594
10	198,4	0,44623	0,44219	44,4209	121,872	301,4	1,519	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	67,40	68,78656	39,25852	37,832606	41,7005	42,829161
11	198,4	0,42001	0,41403	41,702	179,67	299,14	1,508	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	65,56	66,95695	38,214313	36,799091	40,5614	41,68998
12	198,4	0,3938	0,38295	38,8374	270,446	298,22	1,503	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	64,81	66,21216	37,789237	36,378367	40,0976	41,226243
13	198,4	0,37876	0,38648	38,2617	293,611	295,79	1,491	1,1022	1,09095	1,62285	1,64998	62,83	64,24493	36,666482	35,267109	38,8728	40,001371



Densidade real dos grãos: 2,891 su
 deslocamento horizontal: 9,37 mm
 Tensão cisalhante: 255,75 kPa
 Tensão normal líquida: 326,17 kPa
 velocidade: 0,307 mm/seg
 Sucção: 293,611 kPa

Análise de Sucção - Resisual de diabásio - solo 19

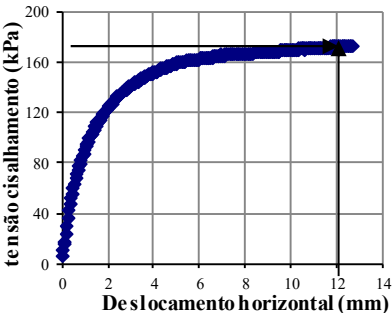
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	208,7	1,23076	1,23338	123,207	7,33203	331,86	1,59	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	81,38	81,34562	47,139272	47,179942	50,9695	50,939637
2	208,7	0,93964	0,94619	94,2915	14,2334	329,47	1,579	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	79,55	79,517	46,0796	46,119977	49,8244	49,794534
3	208,7	0,77267	0,75999	76,6327	23,8041	327,43	1,569	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	77,99	77,95618	45,17511	45,215237	48,847	48,817124
4	208,7	0,92232	0,91002	91,6171	15,2862	325,82	1,561	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	76,76	76,72435	44,461272	44,501201	48,0756	48,045737
5	208,7	0,80675	0,82144	81,4096	20,4892	324,24	1,554	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	75,55	75,51547	43,760735	43,800471	47,3186	47,288723
6	208,7	0,73016	0,7175	72,383	27,4221	322,17	1,544	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	73,97	73,93169	42,842944	42,882426	46,3268	46,296939
7	208,7	0,65518	0,67999	66,7585	33,5138	320,92	1,538	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	73,01	72,9753	42,288722	42,328051	45,7279	45,698036
8	208,7	0,61491	0,63112	62,3015	39,7781	318,06	1,524	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	70,82	70,78708	41,020662	41,059641	44,3576	44,327745
9	208,7	0,47569	0,49541	48,5552	73,8135	314,54	1,507	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	68,13	68,09388	39,459973	39,49852	42,6711	42,641234
10	208,7	0,48033	0,49214	48,6235	73,5566	312,41	1,497	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	66,50	66,46419	38,515579	38,553865	41,6506	41,620702
11	208,7	0,42527	0,4378	43,1537	146,04	310,26	1,487	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	64,86	64,8192	37,562317	37,60034	40,6204	40,590589
12	208,7	0,41169	0,41723	41,4457	186,367	309,48	1,483	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	64,26	64,22242	37,216483	37,25441	40,2467	40,216873
13	208,7	0,43306	0,42437	42,8715	152,044	306,98	1,471	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	62,35	62,30964	36,108039	36,14566	39,0489	39,019067
14	208,7	0,47943	0,4861	48,2765	70,2842	307,17	1,472	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	62,49	62,45501	36,192281	36,229925	39,14	39,1101
15	208,7	0,35755	0,35892	35,8234	415,862	299,03	1,433	1,0803	1,08062	1,67606	1,67532	56,27	56,227	32,583187	32,619834	35,2399	35,210042



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 3,6 mm
Tensão cisalhante: 113,28 kPa
Tensão normal líquida: 104,15 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 415,862 kPa

Análise de Sucção - Residual de diábáso - solo 20

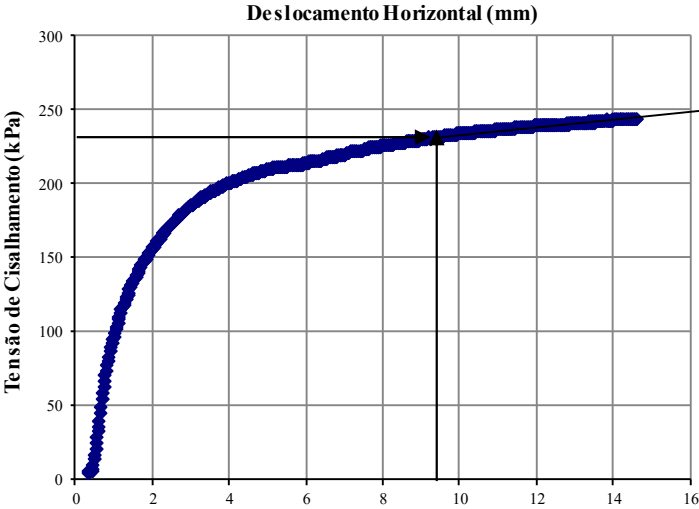
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada((%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	210	1,29225	1,26778	128,002	6,6697	331,99	1,581	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	81,79	82,28701	49,199617	48,582095	51,6887	52,129082
2	210	1,05415	1,06598	106,006	10,6457	329,41	1,569	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	79,84	80,34777	48,040139	47,427416	50,4602	50,900566
3	210	0,85226	0,84796	85,0109	18,4036	327,27	1,558	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	78,23	78,73925	47,078402	46,46966	49,4412	49,881565
4	210	1,00112	0,99773	99,9424	12,3203	325,78	1,551	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	77,11	77,6193	46,408781	45,80281	48,7317	49,172073
5	210	0,88416	0,87785	88,1008	16,8442	324,25	1,544	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	75,96	76,46929	45,721184	45,118059	48,0032	48,443534
6	210	0,75085	0,76496	75,7902	24,4658	322,21	1,534	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	74,42	74,93593	44,804388	44,205057	47,0318	47,47215
7	210	0,70833	0,71237	71,035	28,7308	320,79	1,528	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	73,35	73,8686	44,166226	43,569536	46,3556	46,79599
8	210	0,64204	0,6387	64,0369	37,158	318,4	1,516	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	71,55	72,07217	43,092136	42,499892	45,2176	45,657946
9	210	0,53211	0,51942	52,5763	60,5956	315,14	1,501	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	69,09	69,62181	41,627059	41,040879	43,6653	44,105635
10	210	0,48673	0,48504	48,5888	73,687	312,55	1,488	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	67,14	67,67505	40,463087	39,881725	42,432	42,872358
11	210	0,43488	0,43895	43,6919	135,239	310,33	1,478	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	65,47	66,0064	39,465397	38,888164	41,3749	41,815263
12	210	0,42105	0,42336	42,2207	166,847	309,61	1,474	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	64,93	65,46522	39,141822	38,565928	41,0321	41,472421
13	210	0,39245	0,39907	39,5759	243,387	307,17	1,463	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	63,09	63,63121	38,045262	37,473906	39,8702	40,310569
14	210	0,37566	0,37325	37,4459	329,879	299,03	1,424	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	56,95	57,51282	34,387064	33,83085	35,9942	36,434554
15	210	0,34279	0,34733	34,5062	501,901	321,5	1,531	1,0639	1,05954	1,71724	1,72854	73,88	74,40227	44,485307	43,887297	46,6937	47,13407



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 12,7 mm
Tensão cisalhante: 171,86 kPa
Tensão normal líquida: 225,2 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 501,901 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 21

Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	ρ_w (g/cm³)	ρ_d umidade natural (g/cm³)	ρ_d umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	201,4	0,69037	0,63503	66,2698	34,13	300,45	1,491	1,061	1,06816	1,7247	1,70653	68,01	67,14	39,632656	40,570256	43,0464	42,333908
2	201,4	0,45129	0,42669	43,8992	131,295	299,03	1,484	1,061	1,06816	1,7247	1,70653	66,89	66,02	38,972718	39,905887	42,3414	41,628991



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 9,6 mm
Tensão cisalhante: 232,19 kPa
Tensão normal líquida: 310,7 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 131,295 kPa

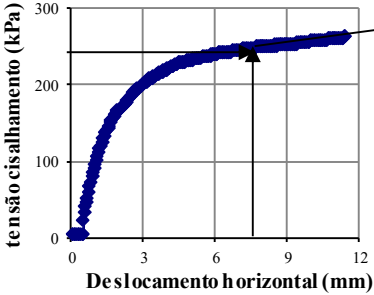
Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 22																	
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	203,2	1,21306	1,19304	120,305	7,77853	325,92	1,604	1,1069	x	1,61179	x	80,51	x	x	44,886761	49,6854	x
2	203,2	0,99782	0,94523	97,1527	13,2164	321,5	1,582	1,1069	x	1,61179	x	76,99	x	x	42,921863	47,5104	x



Densidade real dos grãos: 2,891 su
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 13,2164 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 23

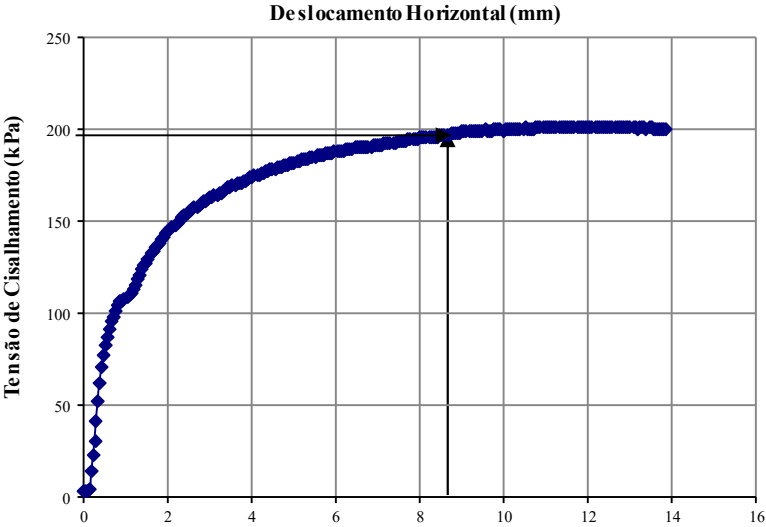
Tentativa (semana)	V (cm ³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm ³)	pd umidade natural (g/cm ³)	pd umidade amolgada (g/cm ³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	210,5	1,20581	1,21956	121,269	7,62612	335,83	1,595	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	80,64	81,8495	47,211629	45,806119	50,1215	51,166196
2	210,5	0,96036	0,96094	96,065	13,5906	333,11	1,583	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	78,57	79,78241	46,019313	44,625186	48,8293	49,874008
3	210,5	0,92933	0,9314	93,0367	14,7142	331,65	1,576	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	77,45	78,67287	45,37932	43,991303	48,1357	49,180407
4	210,5	0,9256	0,92477	92,5184	14,9195	330,1	1,568	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	76,26	77,49494	44,699875	43,318345	47,3993	48,444405
5	210,5	0,80223	0,82019	81,1211	20,6704	328,61	1,561	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	75,13	76,3626	44,046731	42,671437	46,6915	47,736197
6	210,5	0,70014	0,68693	69,3535	30,4895	326,49	1,551	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	73,51	74,75149	43,117425	41,751004	45,6843	46,729051
7	210,5	0,40797	0,77199	58,9982	45,5324	325,09	1,544	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	72,44	73,68755	42,503733	41,143171	45,0193	46,063954
8	210,5	0,61158	0,6217	61,664	40,8057	322,36	1,531	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	70,35	71,61286	41,307033	39,957897	43,7223	44,767015
9	210,5	0,52128	0,51538	51,8333	62,7725	318,94	1,515	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	67,73	69,0138	39,80787	38,473047	42,0976	43,142279
10	210,5	0,47241	0,48999	48,1201	75,4799	316,82	1,505	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	66,11	67,40269	38,878565	37,552614	41,0904	42,135133
11	210,5	0,45655	0,46945	46,3001	93,1946	314,24	1,493	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	64,14	65,442	37,747618	36,432465	39,8648	40,909454
12	210,5	0,41553	0,43394	42,4733	160,937	313,27	1,488	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	63,40	64,70484	37,322417	36,011324	39,4039	40,448637
13	210,5	0,4108	0,39133	40,1063	225,638	310,56	1,475	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	61,33	62,64535	36,134484	34,834733	38,1165	39,1612
14	210,5	0,37832	0,38914	38,3731	288,98	306,02	1,454	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	57,86	59,19514	34,144367	32,863617	35,9597	37,004387
15	210,5	0,34236	0,35997	35,1167	460,005	331,01	1,573	1,0942	1,08376	1,64209	1,66756	76,96	78,1865	45,098774	43,713436	47,8317	48,876363



- Densidade real dos grãos: 2,891 su
- deslocamento horizontal: 8,5 mm
- Tensão cisalhante: 251,66 kPa
- Tensão normal líquida: 322,98 kPa
- velocidade: 0,307 mm/seg
- Sucção: 460,005 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 24

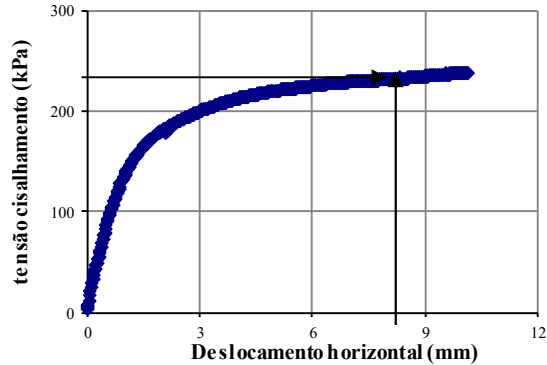
Condição	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pw natural (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgad a(g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
Inundado	209	351,6	1,68232	1,6449	1,15197	x	1,51	x	88,1665	x	x	46,04%	35,7651	x



Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 8,67 mm
Tensão cisalhante: 197,84 kPa
Tensão normal líquida: 312,84 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 25

Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	212	1,11844	1,13019	112,432	9,2002	351,71	1,659	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	85,93	86,04796	45,902891	45,768766	52,0958	52,20045
2	212	0,83598	0,83683	83,6407	19,1604	349,69	1,65	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	84,35	84,47712	45,064917	44,931562	51,1429	51,247512
3	212	0,84953	0,83493	84,2233	18,8334	348,1	1,642	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	83,12	83,24067	44,405324	44,272575	50,3928	50,497427
4	212	0,81144	0,80457	80,8007	20,8742	346,66	1,635	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	82,00	82,12086	43,807956	43,675757	49,7135	49,818105
5	212	0,75631	0,77625	76,6282	23,8076	345,25	1,629	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	0,03077	81,02439	43,223034	43,091372	49,0483	49,152935
6	212	0,66086	0,64058	65,0722	35,7091	343,22	1,619	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	0,03137	79,44578	42,380911	42,250024	48,0906	48,195279
7	212	0,61291	0,59365	60,3282	43,0834	341,73	1,612	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	0,03182	78,28709	41,762802	41,632482	47,3877	47,492369
8	212	0,56303	0,54278	55,2906	53,4842	339,34	1,601	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	0,03258	76,42853	40,771338	40,64193	46,2602	46,364883
9	212	0,47773	0,45352	46,5627	89,7667	335,75	1,584	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	0,03379	73,63679	39,282067	39,154028	44,5667	44,671295
10	212	0,45293	0,45236	45,265	108,037	333,96	1,575	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	0,03443	72,24481	38,539506	38,412149	43,7222	43,826859
11	212	0,40061	0,40909	40,4852	213,756	331,75	1,565	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	0,03525	70,52622	37,622712	37,496199	42,6797	42,784288
12	212	0,38061	0,37331	37,6962	318,298	331,01	1,562	1,1382	1,13719	1,53989	1,54222	0,03554	69,95077	37,315732	37,189501	42,3306	42,435192



Densidade real dos grãos: 2,891 su

deslocamento horizontal: 8,7 mm

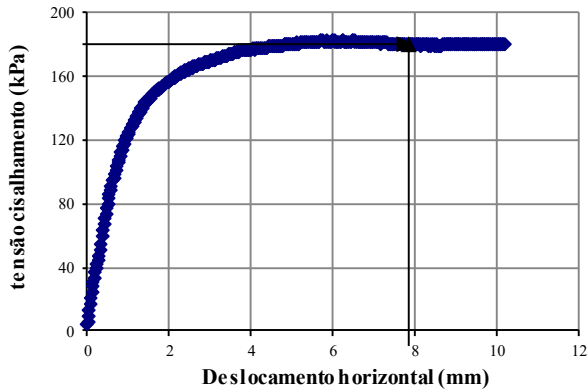
Tensão cisalhante: 233,03 kPa

Tensão normal líquida: 323,66 kPa

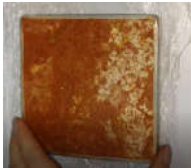
velocidade: 0,307 mm/seg

Sucção: 318,298 kPa

Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 26																	
Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	206,5	1,22891	1,23959	123,425	7,3	354,94	1,719	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	90,15	91,13521	45,750565	44,706484	53,106	53,95695
2	206,5	0,87657	0,89995	88,826	16,5052	352,63	1,708	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	88,25	89,24566	44,801999	43,764714	51,9873	52,838238
3	206,5	0,90037	0,9011	90,0734	15,9441	350,75	1,699	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	86,70	87,70785	44,030007	42,998251	51,0768	51,927772
4	206,5	0,7741	0,77666	77,5376	23,1211	349,24	1,691	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	85,46	86,4727	43,409949	42,382635	50,3456	51,196492
5	206,5	0,64424	0,65132	64,778	36,1126	347,94	1,685	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	0,02827	85,40932	42,876124	41,852634	49,716	50,566914
6	206,5	0,55	0,56279	55,6397	52,6557	346,15	1,676	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	0,02876	83,94512	42,141089	41,122864	48,8491	49,700034
7	206,5	0,49335	0,51168	50,2515	67,7875	344,81	1,67	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	0,02914	82,84902	41,590839	40,576556	48,2001	49,051084
8	206,5	0,53639	0,55063	54,3512	55,8061	343,73	1,665	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	0,02945	81,9656	41,147354	40,136248	47,6771	48,52805
9	206,5	0,42769	0,42376	42,5725	158,673	340,64	1,65	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	0,03039	79,43803	39,878493	38,876477	46,1807	47,031591
10	206,5	0,48048	0,47907	47,9773	76,038	339,8	1,646	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	0,03065	78,75092	39,53356	38,534015	45,7739	46,624787
11	206,5	0,42726	0,40077	41,4012	187,555	337,71	1,635	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	0,03133	77,04134	38,675335	37,681937	44,7617	45,612619
12	206,5	0,38747	0,38583	38,6653	277,175	337,01	1,632	1,1879	1,17937	1,43374	1,4513	0,03156	76,46875	38,387891	37,396552	44,4227	45,273616

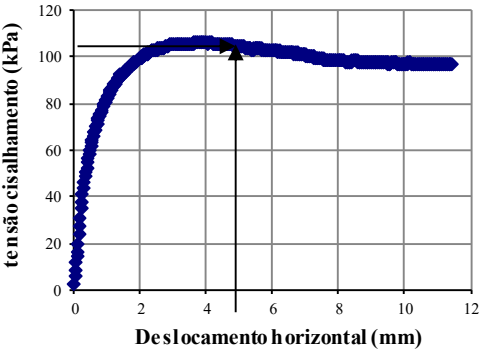


- Densidade real dos grãos: 2,891 su
- deslocamento horizontal: 8 mm
- Tensão cisalhante: 179,49 kPa
- Tensão normal líquida: 213,76 kPa
- velocidade: 0,307 mm/seg
- Sucção: 277,175 kPa



Análise de Sucção - Residual de diabásio - solo 27

Tentativa (semana)	V (cm³)	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada(%)	W amolgada (%)	Wnat (%)	Θ natural (%)	Θamolgada (%)
1	205,9	1,24496	1,22676	123,586	7,27636	350,97	1,704	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	88,91	89,27723	45,170057	44,784539	52,713	53,0256
2	205,9	0,87829	0,874	87,6144	17,077	348,81	1,694	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	87,14	87,51139	44,276627	43,893481	51,6642	51,976792
3	205,9	0,814	0,80987	81,1936	20,6246	347,31	1,686	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	85,92	86,28512	43,656189	43,274691	50,9359	51,248454
4	205,9	0,79832	0,80861	80,3466	21,1681	345,76	1,679	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	84,65	85,01797	43,01507	42,635274	50,1833	50,495837
5	205,9	0,68403	0,6756	67,9815	32,0385	344,42	1,672	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	83,55	83,92249	42,460812	42,082488	49,5326	49,845188
6	205,9	0,56514	0,56254	56,3842	50,9482	342,43	1,663	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	81,92	82,29563	41,637698	41,26156	48,5663	48,878926
7	205,9	0,51685	0,50622	51,1535	64,8619	340,91	1,655	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	80,67	81,05301	41,008987	40,634519	47,8283	48,140876
8	205,9	0,52111	0,53687	52,8988	59,6834	339,84	1,65	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	79,80	80,17826	40,566408	40,193115	47,3088	47,621328
9	205,9	0,39211	0,43229	41,2199	192,472	336,95	1,636	1,177	1,17391	1,45617	1,46271	77,43	77,81564	39,371031	39,000913	45,9055	46,218063



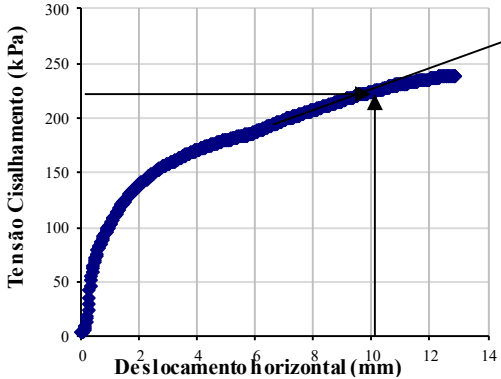
Densidade real dos grãos: 2,891 su
deslocamento horizontal: 4,5 mm
Tensão cisalhante: 105,18 kPa
Tensão normal líquida: 105,11 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 192,472 kPa

APÊNDICE B

O Apêndice C são os resultados detalhados das sucções obtidas dos moldes metálicos indeformados do solo residual de granito, pelo método do item 4.2.3. Além disso, cada molde tem o gráfico deformação *versus* tensão cisalhante, mostrando o ponto de escolha de ruptura.

Análise de Sucção - Residual de granito - solo 1

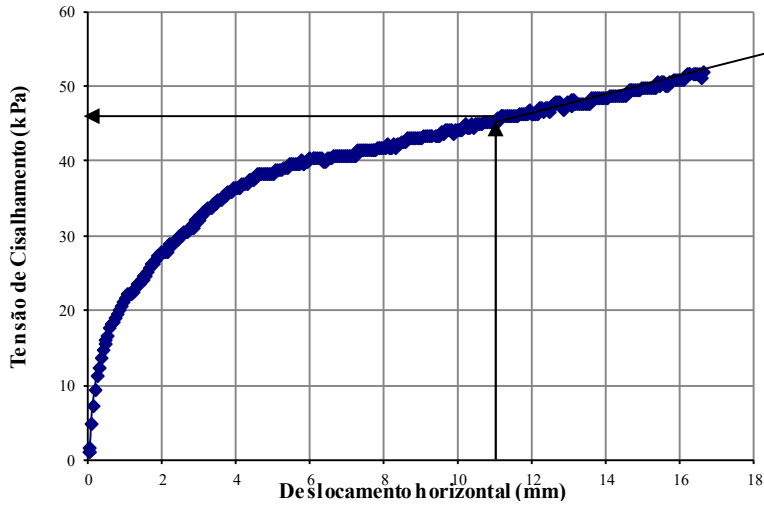
Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgada o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,51697	1,52801	152,24869	4,337776	207,175	367,03	1,771593208	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	97,5062824	97,41763197	38,66753	38,745788	49,47305	49,4009872
2	1,91413	1,43718	167,56542	3,419973	207,175	362,84	1,75136877	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	93,5202542	93,4294184	37,0845	37,161872	47,45061	47,3785434
3	1,3133	1,3288	132,1051	6,167646	207,175	359,61	1,735778093	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	90,4474927	90,35497214	35,86418	35,940858	45,89154	45,8194757
4	1,47234	1,47114	147,17372	4,71825	207,175	357,18	1,724048884	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	88,1357866	88,04199864	34,9461	35,022262	44,71862	44,6465548
5	1,15885	1,12314	114,09908	8,87034	207,175	355,01	1,713574653	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	86,0714235	85,97650379	34,12625	34,201952	43,6712	43,5991317
6	0,68286	0,71141	69,71353	30,1005	207,175	352,6	1,70194198	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	83,7787438	83,68256711	33,21573	33,290916	42,50793	42,4358645
7	0,59407	0,58884	59,14557	45,25149	207,175	351,33	1,6958119	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	82,5705682	82,4737291	32,73591	32,810827	41,89492	41,8228564
8	0,5334	0,52305	52,822763	59,8968	207,175	350,44	1,691516017	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	81,723894	81,62659066	32,39966	32,474387	41,46533	41,3932681
9	0,4858	0,47953	48,266666	74,91257	207,175	349,59	1,687413207	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	80,9152725	80,81752586	32,07852	32,153067	41,05505	40,9829872
10	0,47887	0,47323	47,60477	77,52233	207,175	348,7	1,683117324	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	80,0685983	79,97038741	31,74227	31,816626	40,62546	40,5533989
11	0,37988	0,37839	37,913703	308,5677	207,175	346,59	1,672932703	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	78,0613144	77,96200301	30,94509	31,018998	39,607	39,5349367
12	0,36394	0,36918	36,656239	369,2438	207,175	345,9	1,669602187	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	77,404904	77,30523276	30,68441	30,758162	39,27395	39,2018851
13	0,38355	0,37104	37,729172	316,8045	207,175	345,15	1,665982061	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	76,6914145	76,59135205	30,40105	30,474645	38,91194	38,8398725
14	0,31331	0,32079	31,705092	748,6594	207,175	342,49	1,65314268	1,276863	1,277583	1,029976	1,02883	74,160905	74,05945513	29,39607	29,469104	37,628	37,5559344



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 10 mm
Tensão cisalhante: 224,01 kPa
Tensão normal líquida: 216,13 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 748,6594 kPa

Análise de Sucção - Residual de granito - solo 2 - inundado

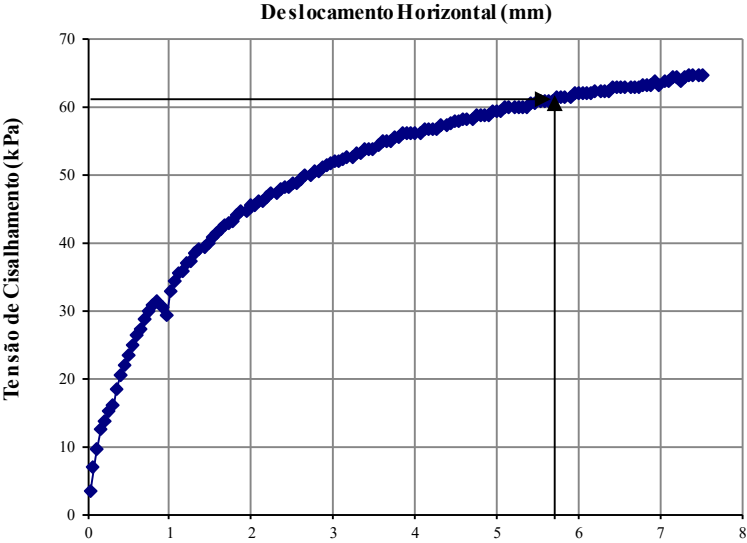
Condição	V (cm³)	Massa úmida final (g)	ρw (g/cm³)	ρw campo (g/cm³)	pd umidade campo (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e campo (su)	e amolgado (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ (%) Ps natural	Θ (%) Ps amolgado
Inundado	208,46685	358,22	1,7183547	1,49221	1,2958272	x	1,0002668	x	30,314083	x	x	15,15502	22,614472	x



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 11,04 mm
Tensão cisalhante: 45,26 kPa
Tensão normal líquida: 53,46 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

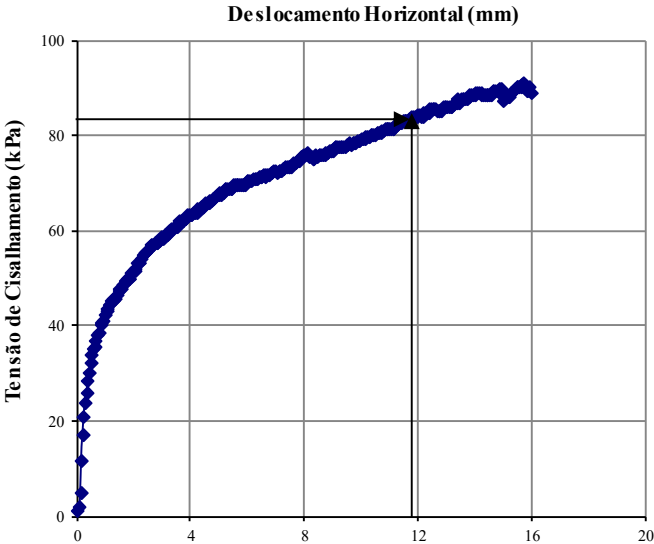
Análise de Sucção - Resisul de granito - solo 3

Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgada (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,39344	1,40157	139,75042	5,364438	203,238	389,39	1,915933056	1,378053	1,383967	0,880915	0,87288	114,84729	114,140623	38,4378	39,031893	53,78801	53,1966315
2	1,19666	1,16838	118,25208	8,117723	203,238	386,43	1,901368835	1,378053	1,383967	0,880915	0,87288	111,737561	111,015671	37,38544	37,975024	52,33159	51,7402094
3	0,60075	0,5688	58,477432	46,54457	203,238	384,42	1,891478942	1,378053	1,383967	0,880915	0,87288	109,625888	108,8936597	36,67084	37,257352	51,3426	50,7512201



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 5,7 mm
Tensão cisalhante: 60,7 kPa
Tensão normal líquida: 53,45 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 46,544571 kPa

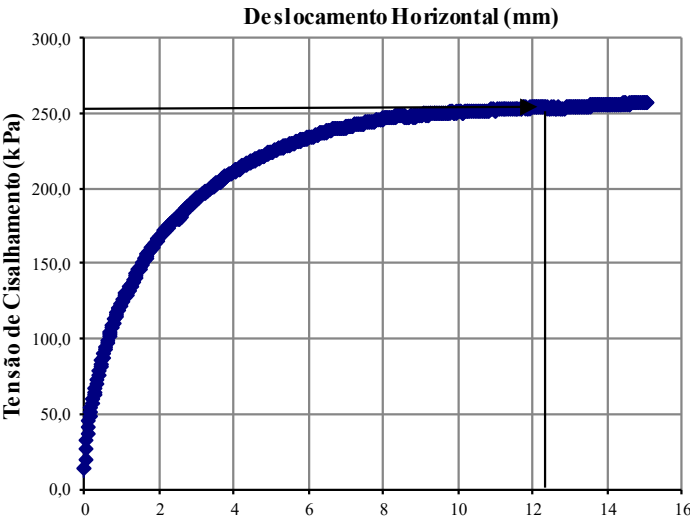
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 4 - inundado													
Condição	V (cm³)	Massa úmida final (g)	ρw (g/cm³)	ρw campo (g/cm³)	pd umidade campo(g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e campo (su)	e amolgado (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ (%) Ps natural
Inundado	206,474	380,53	1,8429923	1,522234	1,2573011	x	1,0615587	x	43,440247	x	x	21,071555	32,075836



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 12,3 mm
Tensão cisalhante: 84,64 kPa
Tensão normal líquida: 114,24 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 350,2447 kPa

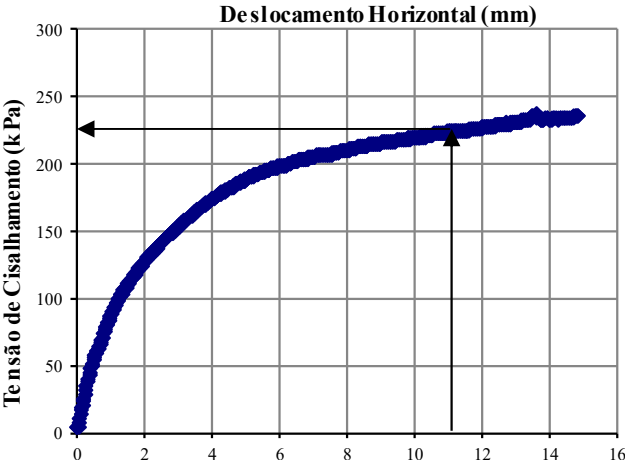
Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 5

Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,4692	1,48396	147,65803	4,679963	207,175	376,1	1,8153726	1,301239	1,273231	0,991947	1,03577	103,244034	106,5562207	42,57994	39,511042	51,41332	54,2141193
2	1,37507	1,39936	138,72175	5,463632	207,175	372,99	1,800361144	1,301239	1,273231	0,991947	1,03577	100,229556	103,6057641	41,40094	38,357415	49,91218	52,7129736
3	1,12915	1,14292	113,6038	8,966557	207,175	370,3	1,787376958	1,301239	1,273231	0,991947	1,03577	97,6221776	101,0537614	40,38116	37,359582	48,61376	51,4145551
4	1,07445	1,08859	108,15193	10,12966	207,175	368,19	1,777192336	1,301239	1,273231	0,991947	1,03577	95,5769852	99,05200466	39,58125	36,576896	47,5953	50,3960929
5	0,77817	0,68333	73,074933	26,7827	207,175	366,36	1,768359228	1,301239	1,273231	0,991947	1,03577	93,8031926	97,31588388	38,8875	35,898073	46,71199	49,5127821
6	0,47633	0,65401	56,516936	50,65205	207,175	363,92	1,756581751	1,301239	1,273231	0,991947	1,03577	91,438136	95,00105618	37,96249	34,992977	45,53424	48,3350344
7	0,54846	0,29126	41,985964	172,5322	207,175	362,75	1,750934355	1,301239	1,273231	0,991947	1,03577	90,3040719	93,89107733	37,51894	34,558975	44,9695	47,7702947
8	0,41564	0,40979	41,27174	191,0522	207,175	361,9	1,746831545	1,301239	1,273231	0,991947	1,03577	89,4801792	93,08468243	37,19671	34,243675	44,55922	47,3600138



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 12,3 mm
Tensão cisalhante: 84,64 kPa
Tensão normal líquida: 114,24 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 191,05223 kPa

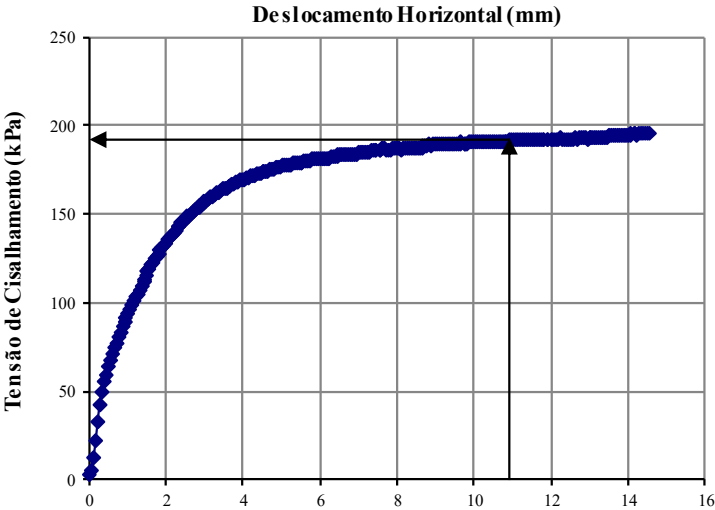
Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 6																	
Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,35283	1,57204	146,24354	4,793026	192,676	297,94	1,546330368	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	76,9804404	83,53216464	47,39563	39,992993	44,17534	49,7228464
2	1,44924	1,45387	145,15558	4,882613	192,676	293,56	1,523597848	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	73,019046	79,71320265	45,22878	37,934964	41,90209	47,4495944
3	1,31368	1,3543	133,39889	6,020361	192,676	289,85	1,504342677	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	69,6636184	76,47841977	43,39338	36,191747	39,97657	45,5240772
4	1,40855	1,44599	142,72695	5,091258	192,676	287,09	1,490018075	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	67,1673973	74,07195057	42,02796	34,894906	38,54411	44,0916171
5	0,97232	0,96089	96,660534	13,38388	192,676	284,56	1,47688719	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	64,8791946	71,86602047	40,77633	33,706136	37,23102	42,7785286
6	0,62159	0,65401	63,780068	37,53023	192,676	282,18	1,464534816	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	62,7266561	69,79087674	39,59891	32,587846	35,99578	41,5432912
7	0,5085	0,5171	51,280367	64,46459	192,676	280,74	1,457061111	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	61,4242799	68,53532759	38,88652	31,911233	35,24841	40,7959207
8	0,4787	0,45099	46,48415	90,77844	192,676	279,8	1,452182443	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	60,5741176	67,71573301	38,42149	31,469556	34,76055	40,3080538
9	0,41895	0,38615	40,254959	220,8984	192,676	278,93	1,447667079	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	59,7872653	66,95717207	37,99108	31,060769	34,30901	39,8565175
10	0,4064	0,4218	41,410369	187,3083	192,676	277,89	1,442269403	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	58,8466603	66,05038657	37,47658	30,572105	33,76924	39,3167499
11	0,3327	0,3292	33,094631	613,9499	192,676	275,37	1,429190419	1,104577	1,049102	1,3466	1,47068	56,5675019	63,85317556	36,22989	29,388033	32,46134	38,0088515



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 11,14 mm
Tensão cisalhante: 224,16 kPa
Tensão normal líquida: 324,7 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 613,94985 kPa

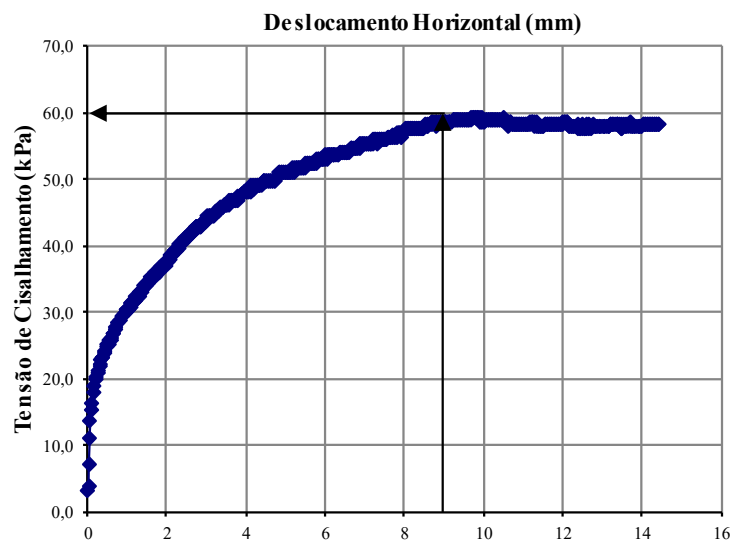
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 8 - inundado

Condição	V (cm³)	Massa úmida final (g)	pw (g/cm³)	pw campo (g/cm³)	pd umidade campo(g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e campo (su)	e amolgado (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ (%) Ps natural	Θ (%) Ps amolgado
Inundado	204,7537	336,68	1,6443171	1,6443171	1,1991614	x	1,1615105	x	80,240129	x	x	37,122247	44,515566	x



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 13,26 mm
Tensão cisalhante: 193,29 kPa
Tensão normal líquida: 329,34 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

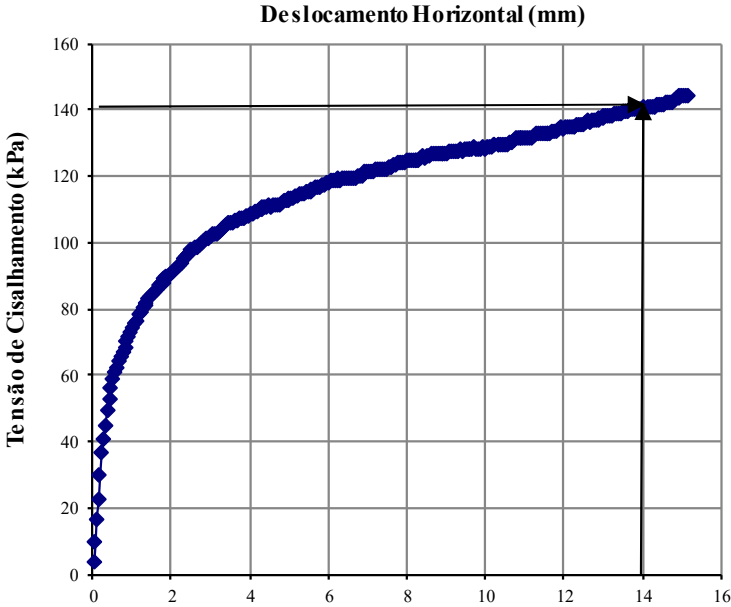
Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 10																	
Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,3986	1,43386	141,62338	5,190215	206,084	350,7	1,701735751	1,209303	1,20792	1,143384	1,14584	92,3113498	92,47808151	40,88151	40,720418	49,24331	49,3815873



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 9 mm
Tensão cisalhante: 58,63 kPa
Tensão normal líquida: 51,6 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 5,1902149 kPa

Análise de Sucção - Residual de granito - solo 12 - inundado

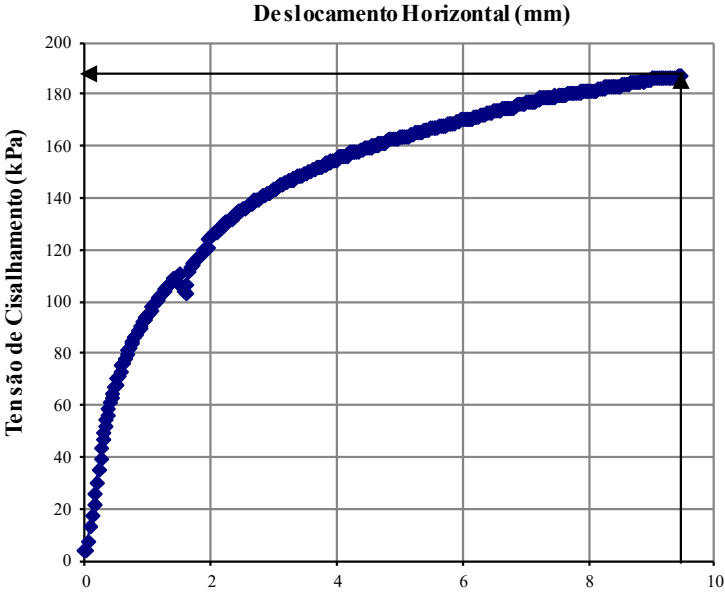
Condição	V (cm³)	Massa úmida final (g)	ρw (g/cm³)	ρw campo (g/cm³)	pd umidade campo(g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e campo (su)	e amolgado (su)	Saturação campo (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	Wcampo (%)	Θ (%) Ps natural	Θ (%) Ps amolgado
Inundado	205,8821	379,29	1,842268	1,842268	1,3481932	x	0,9225731	x	70,456881	x	x	36,647179	49,407479	x



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 14,2 mm
Tensão cisalhante: 140,86 kPa
Tensão normal líquida: 221,84 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 13

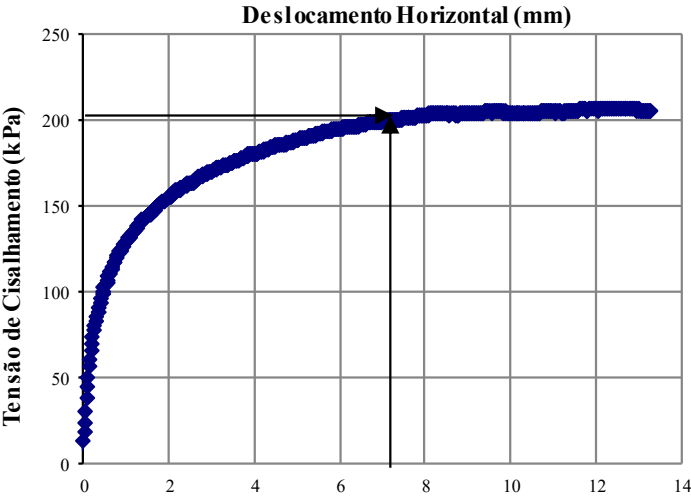
Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,27592	1,25553	126,57232	6,858039	199,101	322,74	1,620989346	1,196707	1,193042	1,165944	1,1726	78,8178909	79,29034635	35,87021	35,454197	42,42827	42,7946858
2	0,72288	0,73218	72,752983	27,07759	199,101	321,06	1,612551402	1,196707	1,193042	1,165944	1,1726	77,2503961	77,7269571	35,16295	34,749099	41,58448	41,9508914
3	0,49095	0,49564	49,329393	70,97374	199,101	319,26	1,603510747	1,196707	1,193042	1,165944	1,1726	75,5709373	76,0518972	34,40517	33,993638	40,68041	41,046826
4	0,38804	0,41821	40,312648	219,0866	199,101	318,26	1,598488161	1,196707	1,193042	1,165944	1,1726	74,6379047	75,12130836	33,98418	33,573937	40,17815	40,5445674



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 14,2 mm
Tensão cisalhante: 140,86 kPa
Tensão normal líquida: 221,84 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 219,08662 kPa

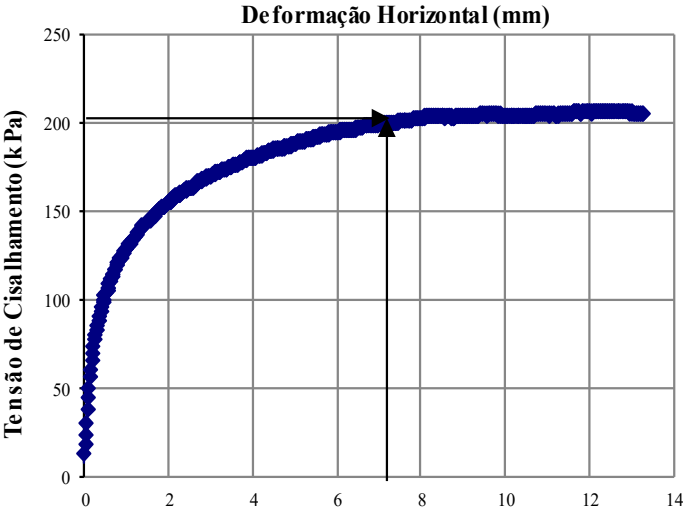
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 14

Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,58254	1,5528	156,76741	4,034276	203,238	358,92	1,76601015	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	95,9738438	105,8973297	47,72904	37,932475	48,56662	57,0571402
2	1,46117	1,48318	147,21756	4,714766	203,238	356,29	1,753069643	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	93,4166342	103,495588	46,64655	36,921769	47,27257	55,7630895
3	1,23582	1,26495	125,03859	7,068557	203,238	353,99	1,74175285	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	91,1802912	101,3952056	45,69988	36,037883	46,14089	54,6314102
4	0,84271	0,89935	87,103168	17,3267	203,238	352,35	1,733683485	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	89,5856814	99,89754155	45,02487	35,407633	45,33395	53,8244736
5	0,69838	0,74658	72,248028	27,54936	203,238	351,27	1,728369512	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	88,5355725	98,91127501	44,58035	34,99259	44,80255	53,2930764
6	0,58401	0,60504	59,452667	44,67402	203,238	350,26	1,723399964	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	87,5535262	97,98893315	44,16464	34,604449	44,3056	52,7961216
7	0,47991	0,49925	48,958186	72,3158	203,238	349,36	1,718971654	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	86,6784355	97,16704436	43,79421	34,25858	43,86277	52,3532905
8	0,50707	0,48134	49,420375	70,65014	203,238	348,06	1,712575206	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	85,4144155	95,97987167	43,25913	33,758991	43,22312	51,7136457
9	0,34138	0,35567	34,852395	477,6959	203,238	345,41	1,699536292	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	82,8377594	93,5598658	42,16841	32,7406	41,91923	50,4097544



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 6,92 mm
Tensão cisalhante: 198,83 kPa
Tensão normal líquida: 317,46 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

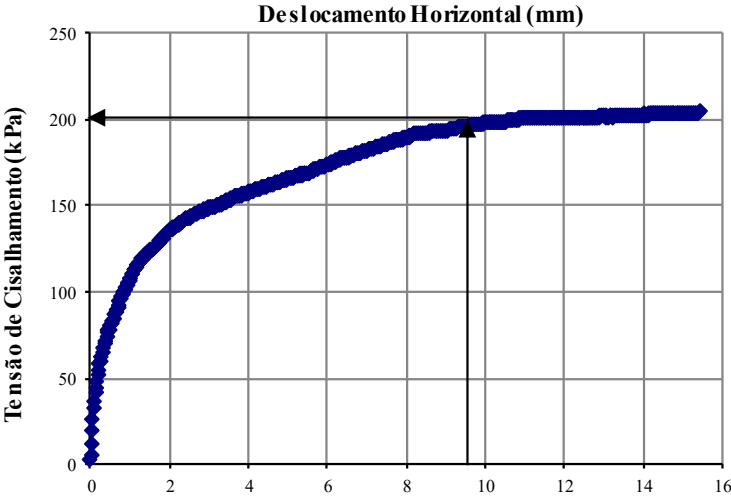
Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 14																	
Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,58254	1,5528	156,76741	4,034276	203,238	358,92	1,76601015	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	95,9738438	105,8973297	47,72904	37,932475	48,56662	57,0571402
2	1,46117	1,48318	147,21756	4,714766	203,238	356,29	1,753069643	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	93,4166342	103,495588	46,64655	36,921769	47,27257	55,7630895
3	1,23582	1,26495	125,03859	7,068557	203,238	353,99	1,74175285	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	91,1802912	101,3952056	45,69988	36,037883	46,14089	54,6314102
4	0,84271	0,89935	87,103168	17,3267	203,238	352,35	1,733683485	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	89,5856814	99,89754155	45,02487	35,407633	45,33395	53,8244736
5	0,69838	0,74658	72,248028	27,54936	203,238	351,27	1,728369512	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	88,5355725	98,91127501	44,58035	34,99259	44,80255	53,2930764
6	0,58401	0,60504	59,452667	44,67402	203,238	350,26	1,723399964	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	87,5535262	97,98893315	44,16464	34,604449	44,3056	52,7961216
7	0,47991	0,49925	48,958186	72,3158	203,238	349,36	1,718971654	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	86,6784355	97,16704436	43,79421	34,25858	43,86277	52,3532905
8	0,50707	0,48134	49,420375	70,65014	203,238	348,06	1,712575206	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	85,4144155	95,97987167	43,25913	33,758991	43,22312	51,7136457
9	0,34138	0,35567	34,852395	477,6959	203,238	345,41	1,699536292	1,280344	1,195439	1,024456	1,16824	82,8377594	93,5598658	42,16841	32,7406	41,91923	50,4097544



Densidade real dos grãos: 2,592 su
Deformação horizontal: 6,92 mm
Tensão cisalhante: 198,83 kPa
Tensão normal líquida: 317,46 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

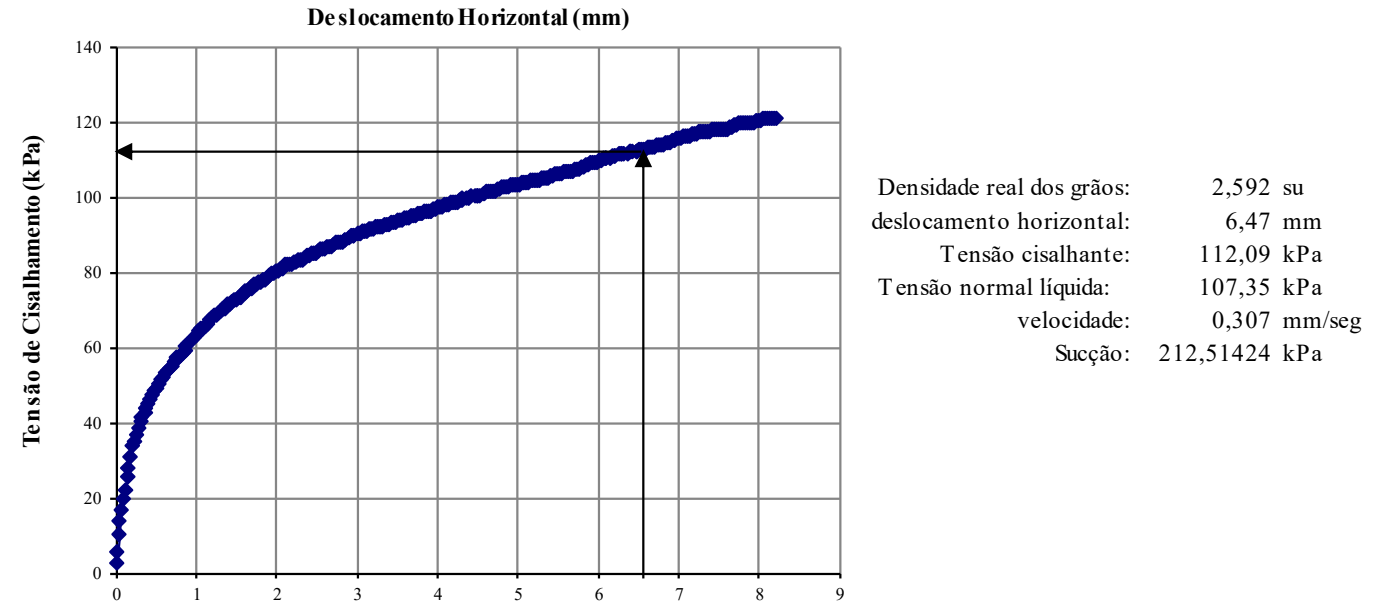
Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 15

Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgada o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,47917	1,4935	148,63316	4,604188	205,272	318,37	1,550967882	1,118937	1,115161	1,316485	1,32433	76,0201314	76,48850682	39,08022	38,610857	43,20311	43,5807244
2	1,30496	1,2816	129,32837	6,501287	205,272	316,4	1,541370852	1,118937	1,115161	1,316485	1,32433	74,3314391	74,80413242	38,21962	37,753166	42,24341	42,6210213
3	0,8814	0,9198	90,060344	15,94985	205,272	313,97	1,52953289	1,118937	1,115161	1,316485	1,32433	72,248433	72,72645233	37,15808	36,6952	41,05961	41,4372251
4	0,55412	0,5802	56,71612	50,21204	205,272	312,57	1,522712665	1,118937	1,115161	1,316485	1,32433	71,0483471	71,52943499	36,54649	36,085673	40,37759	40,7552026
5	0,43841	0,43823	43,831719	132,5664	205,272	311,43	1,517159053	1,118937	1,115161	1,316485	1,32433	70,0711343	70,55472087	36,04848	35,589344	39,82223	40,1998414
6	0,43188	0,42233	42,710172	155,5856	205,272	310,6	1,513115634	1,118937	1,115161	1,316485	1,32433	69,3596549	69,84506059	35,68589	35,227981	39,41788	39,7954995
7	0,41149	0,41107	41,127941	195,0148	205,272	309,79	1,509169646	1,118937	1,115161	1,316485	1,32433	68,6653195	69,15250056	35,33204	34,875326	39,02329	39,4009008



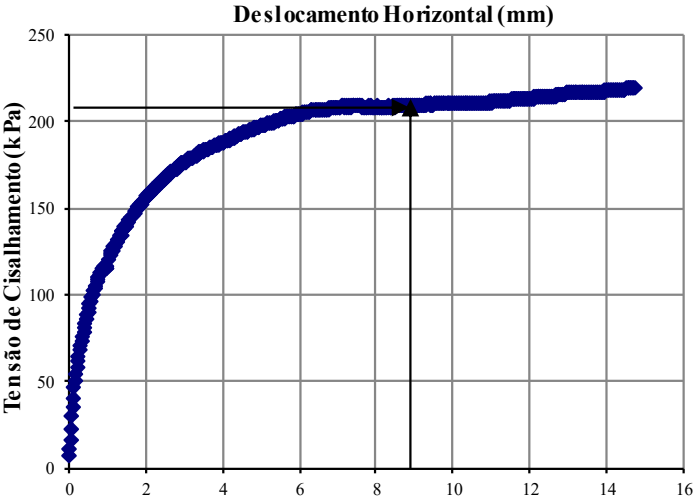
Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 9,9 mm
Tensão cisalhante: 197,85 kPa
Tensão normal líquida: 216,12 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 195,01483 kPa

Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 16																	
Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolga d o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	0,96116	0,88493	92,304658	15,00533	231,453	377,01	1,62888373	1,212331	1,199911	1,138031	1,16016	78,2583011	79,87257621	35,75038	34,359705	41,65532	42,8972747
2	0,62908	0,61905	62,406212	39,61275	231,453	375,55	1,622575754	1,212331	1,199911	1,138031	1,16016	77,0732146	78,69806258	35,22468	33,839387	41,02452	42,2664771
3	0,47826	0,49552	48,688872	73,31187	231,453	373,93	1,615576492	1,212331	1,199911	1,138031	1,16016	75,7582558	77,39483513	34,64136	33,262047	40,3246	41,5665509
4	0,40393	0,40659	40,525999	212,5142	231,453	372,88	1,611039934	1,212331	1,199911	1,138031	1,16016	74,9059676	76,55015067	34,26329	32,887846	39,87094	41,1128951



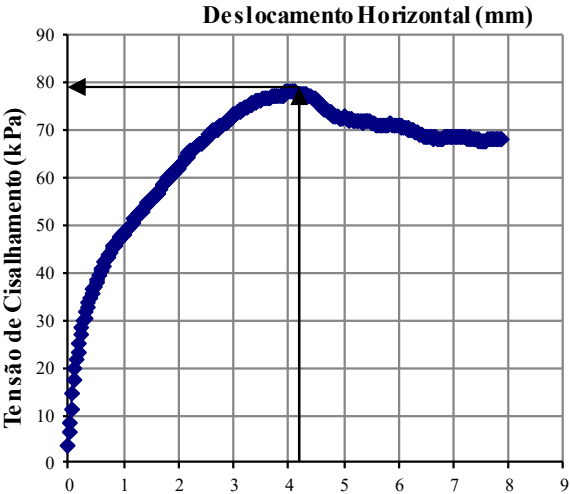
Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 17

Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,2948	1,16403	122,94129	7,371392	205,882	376,43	1,828376554	1,372013	1,341161	0,889195	0,93265	96,9596267	100,9611996	36,32785	33,262365	45,63639	48,7215139
2	0,74216	0,75116	74,666176	25,38942	205,882	374,39	1,81846797	1,372013	1,341161	0,889195	0,93265	94,8544368	98,90793318	35,58905	32,540172	44,64553	47,7306556
3	0,52597	0,52389	52,492901	60,83459	205,882	372,85	1,810987961	1,372013	1,341161	0,889195	0,93265	93,2652249	97,35791831	35,03132	31,994987	43,89753	46,9826546
4	0,43566	0,43388	43,477161	139,4492	205,882	371,85	1,806130812	1,372013	1,341161	0,889195	0,93265	92,2332691	96,35141515	34,66916	31,64097	43,41181	46,4969397
5	0,3815	0,37722	37,935851	307,5936	205,882	370,99	1,801953664	1,372013	1,341161	0,889195	0,93265	91,3457871	95,48582243	34,3577	31,336516	42,9941	46,0792249
6	0,37525	0,38621	38,073139	301,6236	205,882	370,15	1,797873659	1,372013	1,341161	0,889195	0,93265	90,4789442	94,64035978	34,05349	31,039142	42,5861	45,6712244
7	0,36004	0,37572	36,787765	362,3753	205,882	369,31	1,793793654	1,372013	1,341161	0,889195	0,93265	89,6121013	93,79489712	33,74927	30,741769	42,1781	45,2632239
8	0,33595	0,33871	33,733197	560,4564	205,882	368,36	1,789179363	1,372013	1,341161	0,889195	0,93265	88,6317433	92,83871912	33,40522	30,405453	41,71667	44,8017948



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 9 mm
Tensão cisalhante: 209,24 kPa
Tensão normal líquida: 216,13 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 560,45638 kPa

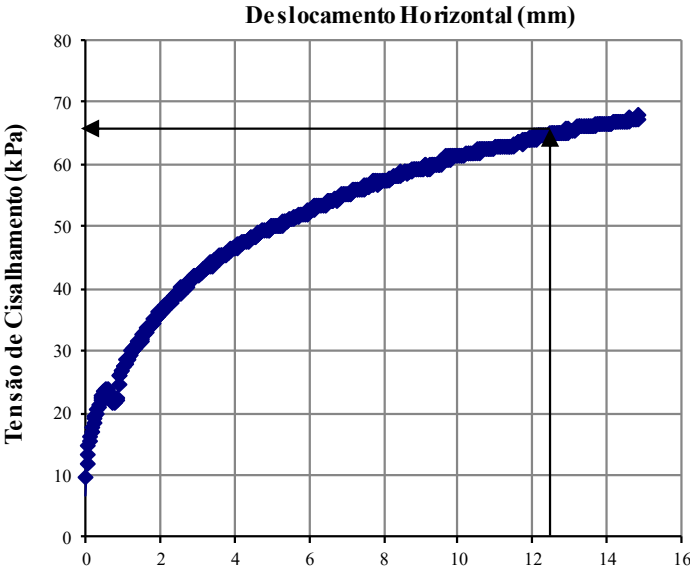
Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 18																	
Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgada (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,46814	1,43968	145,39088	4,863039	201,442	296,9	1,473873373	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	67,9980226	68,68509745	37,64709	36,947939	39,76444	40,3110913
2	1,20396	1,19345	119,87052	7,84862	201,442	294,95	1,464193167	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	66,3426873	67,03571052	36,74304	36,048483	38,79642	39,3430707
3	0,85454	0,85552	85,5031	18,14199	201,442	293,1	1,455009382	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	64,772241	65,47090753	35,88536	35,195153	37,87804	38,4246923
4	0,6205	0,61916	61,983172	40,28663	201,442	291,81	1,448605554	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	63,677173	64,37977464	35,28729	34,600129	37,23766	37,7843094
5	0,52202	0,50634	51,417905	64,03779	201,442	290,75	1,443343493	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	62,7773497	63,48318481	34,79586	34,111194	36,71145	37,2581034
6	0,46059	0,44524	45,291412	107,6298	201,442	289,59	1,437585012	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	61,7926374	62,50201105	34,25807	33,576133	36,13561	36,6822552
7	0,36059	0,36661	36,359741	385,2087	201,442	288,74	1,433365435	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	61,071081	61,78304751	33,864	33,184062	35,71365	36,2602975
8	0,38181	0,37016	37,598368	322,776	201,442	287,45	1,426961607	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	59,9760131	60,69191462	33,26594	32,589037	35,07327	35,6199147
9	0,36242	0,34935	35,58876	430,0281	201,442	286,02	1,419862789	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	58,7621005	59,4823642	32,60297	31,929436	34,36338	34,9100329
10	0,29554	0,28217	28,885384	1119,712	201,442	283,5	1,407352985	1,076229	1,070762	1,408409	1,4207	56,622898	57,35084878	31,43466	30,767062	33,1124	33,6590525



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 4,2 mm
Tensão cisalhante: 77,48 kPa
Tensão normal líquida: 52,62 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 1119,7117 kPa

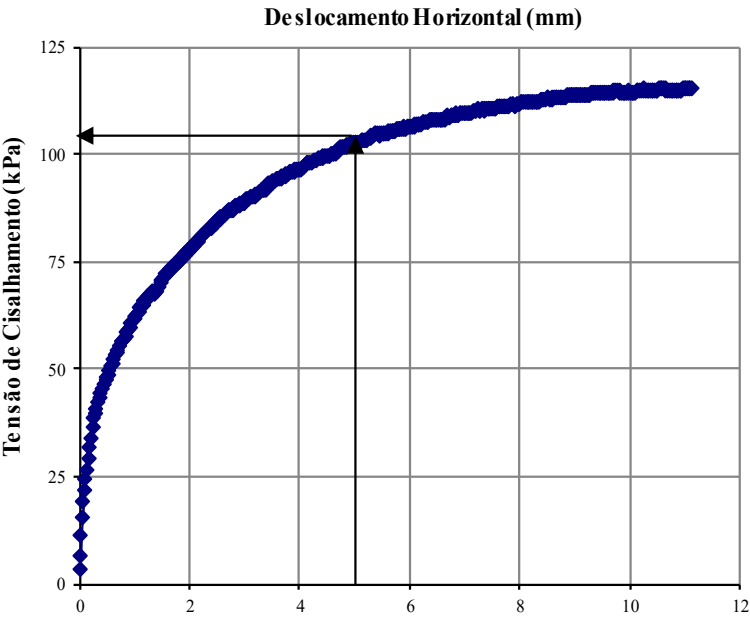
Análise de Sucção - Resisual de granito - solo 19

Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgad o (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,43515	1,4513	144,32259	4,952802	186,647	271,4	1,454085253	1,060738	1,042671	1,443581	1,48592	66,5826994	68,82892205	39,45777	37,08238	39,3347	41,1414624
2	1,15752	1,13764	114,75774	8,744614	186,647	269,38	1,443262659	1,060738	1,042671	1,443581	1,48592	64,7507353	67,01832154	38,41981	36,062091	38,25244	40,0592029
3	0,76258	0,74146	75,202253	24,94293	186,647	267,59	1,433672339	1,060738	1,042671	1,443581	1,48592	63,1273611	65,4138785	37,50002	35,157973	37,29341	39,100171
4	0,53664	0,55088	54,376093	55,74272	186,647	266,45	1,427564538	1,060738	1,042671	1,443581	1,48592	62,0934804	64,39205445	36,91424	34,582167	36,68263	38,4893909
5	0,42135	0,41597	41,866215	175,5071	186,647	265,54	1,422689013	1,060738	1,042671	1,443581	1,48592	61,2681896	63,57638788	36,44664	34,122532	36,19508	38,0018384



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 12,5 mm
Tensão cisalhante: 64,87 kPa
Tensão normal líquida: 55,47 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 175,5071 kPa

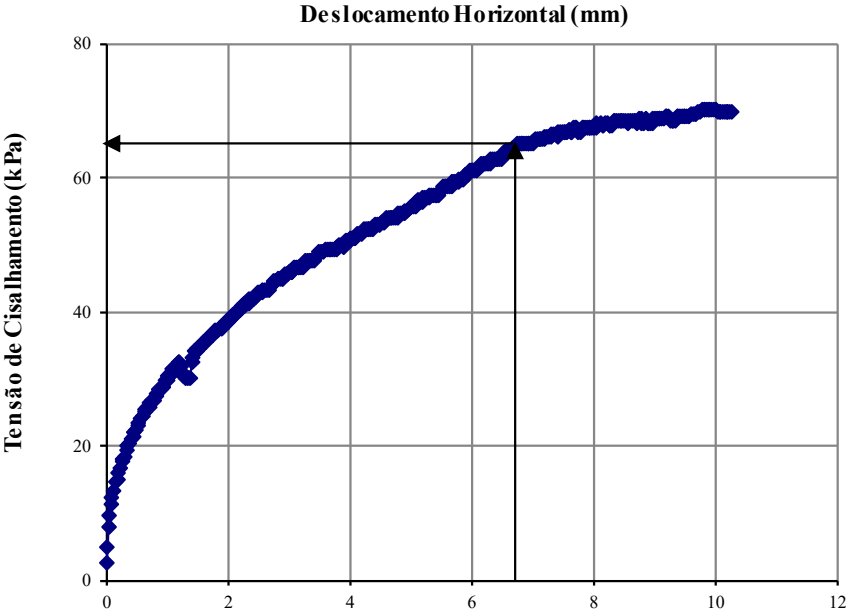
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 20																	
Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,03835	1,15171	109,50293	9,822547	208,997	336,04	1,607867661	1,177619	1,168301	1,201051	1,21861	78,8475355	80,02792043	37,62443	36,535474	43,02487	43,9566615
2	0,70768	0,6752	69,143932	30,7192	208,997	334,34	1,599733585	1,177619	1,168301	1,201051	1,21861	77,3568815	78,54702266	36,9282	35,844752	42,21146	43,1432538
3	0,47225	0,46219	46,721939	87,74852	208,997	332,15	1,589254981	1,177619	1,168301	1,201051	1,21861	75,4365686	76,6392779	36,03129	34,954939	41,1636	42,0953934



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 5,74 mm
Tensão cisalhante: 105,55 kPa
Tensão normal líquida: 106,51 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 87,748518 kPa

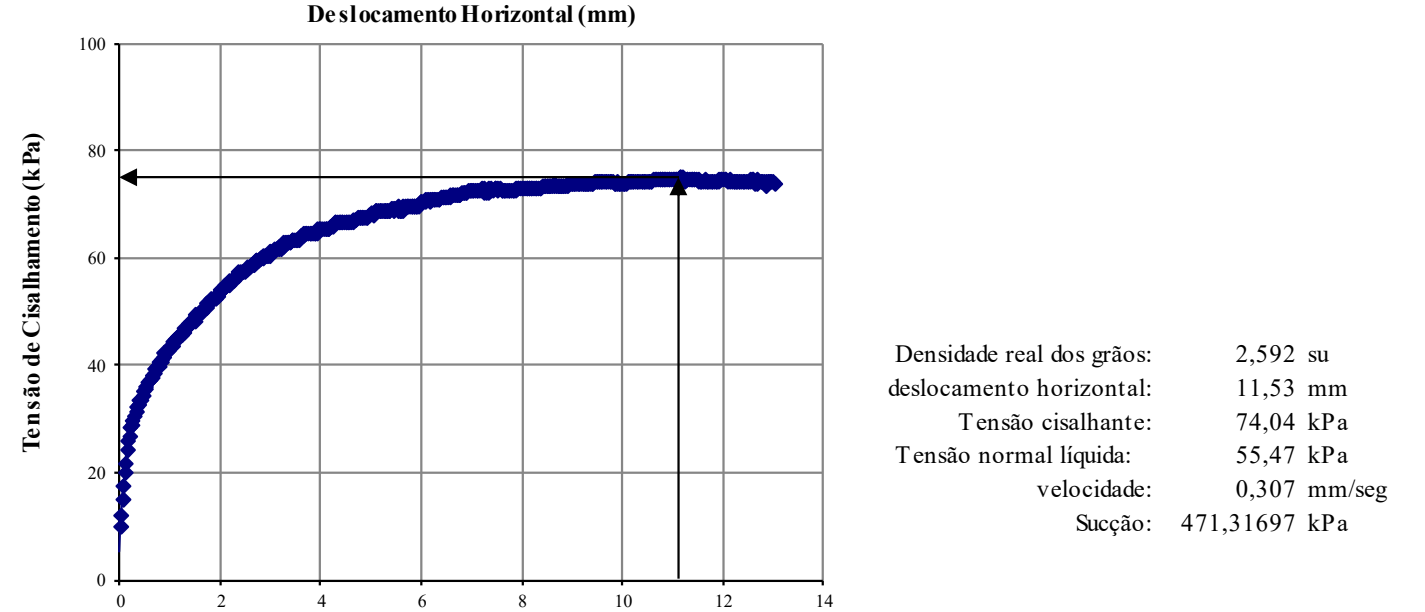
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 21

Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	0,65694	0,60536	63,114968	38,51871	205,12	319,75	1,558845884	1,167102	1,148548	1,220887	1,25676	71,2613164	73,67702411	35,7232	33,565579	39,17444	41,029808
2	0,44384	0,46004	45,193935	109,138	205,12	318,58	1,553141897	1,167102	1,148548	1,220887	1,25676	70,2237173	72,65276207	35,22658	33,076848	38,60404	40,4594093



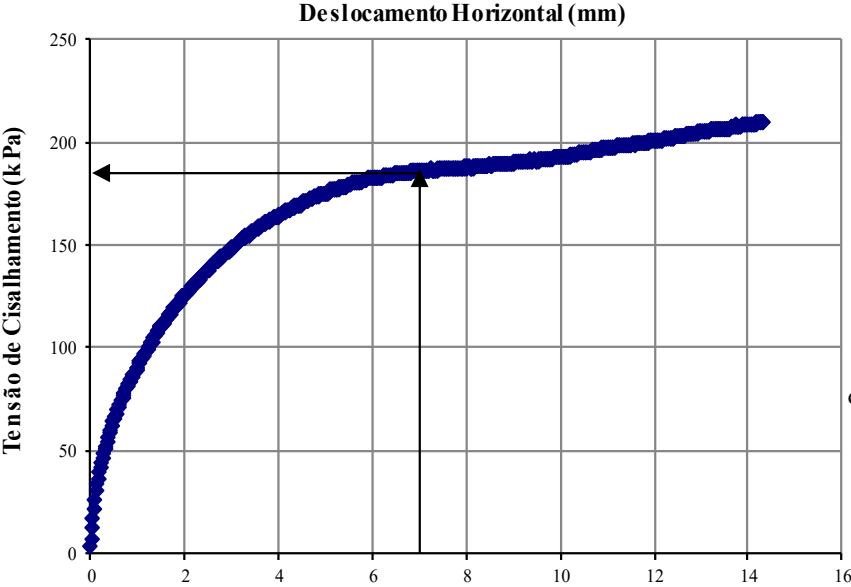
Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 6,68 mm
Tensão cisalhante: 64,47 kPa
Tensão normal líquida: 54,03 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 109,138 kPa

Análise de Sucção - Residual de granito - solo 22																	
Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgada (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,04681	1,07661	106,17107	10,60485	207,04	311,52	1,504639692	1,176157	1,096852	1,203787	1,36313	60,1356367	70,69435038	37,17797	27,928422	32,84822	40,778741
2	0,68523	0,67806	68,164552	31,82546	207,04	310,02	1,497394701	1,176157	1,096852	1,203787	1,36313	58,8092875	69,438353	36,51744	27,312434	32,12372	40,0542419
3	0,48763	0,49835	49,29887	71,08277	207,04	308,48	1,489956511	1,176157	1,096852	1,203787	1,36313	57,447569	68,14886235	35,8393	26,680019	31,3799	39,3104228
4	0,42442	0,42047	42,244678	166,2761	207,04	307	1,48280812	1,176157	1,096852	1,203787	1,36313	56,1389044	66,9096116	35,18759	26,072244	30,66507	38,5955837
5	0,34255	0,35638	34,946563	471,317	207,04	305,87	1,477350227	1,176157	1,096852	1,203787	1,36313	55,1397214	65,96342691	34,68999	25,6082	30,11928	38,0497944



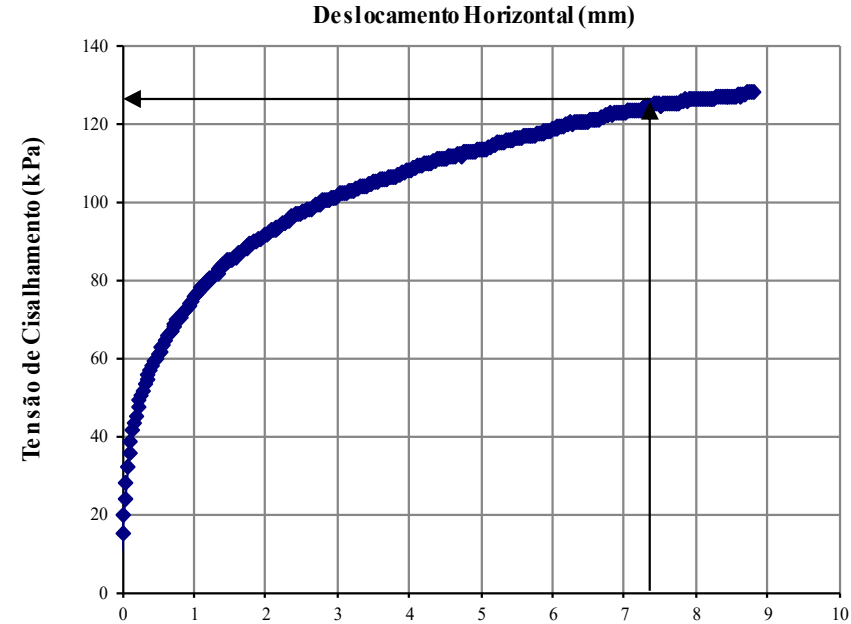
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 23

Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	0,64558	0,68885	66,721483	33,55993	204,754	299,22	1,461365533	1,078503	1,065629	1,403332	1,43237	65,5686953	67,20177455	37,13638	35,499476	38,28628	39,5736171
2	0,45653	0,43971	44,812035	115,2534	204,754	297,261	1,451797941	1,078503	1,065629	1,403332	1,43237	63,9301592	65,57705775	36,23855	34,612358	37,32952	38,6168578



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 7,25 mm
Tensão cisalhante: 186,91 kPa
Tensão normal líquida: 211,99 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 0 kPa

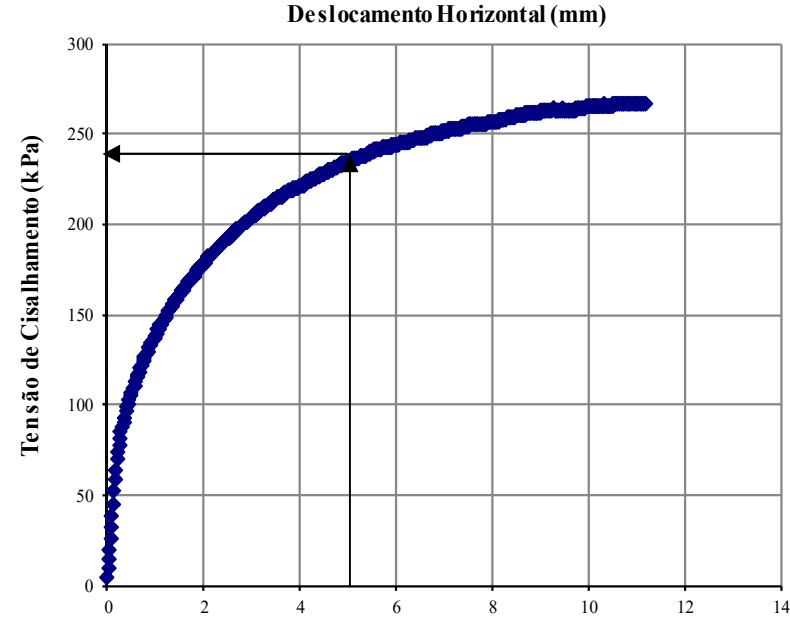
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 24																	
Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	0,75033	0,80644	77,838468	22,90014	211,31	334,34	1,582225092	1,185712	1,188793	1,186028	1,18036	73,0832775	72,67466763	33,09509	33,440893	39,65128	39,3432114
2	0,4931	0,47424	48,36716	74,52716	211,31	332,65	1,574227364	1,185712	1,188793	1,186028	1,18036	71,6091758	71,19732958	32,42233	32,766385	38,85151	38,5434386
3	0,36872	0,38261	37,566528	324,2465	211,31	331,07	1,566750198	1,185712	1,188793	1,186028	1,18036	70,2310215	69,81614964	31,79336	32,135779	38,10379	37,795722



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 7,37 mm
Tensão cisalhante: 124,2 kPa
Tensão normal líquida: 108,4 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 324,24648 kPa

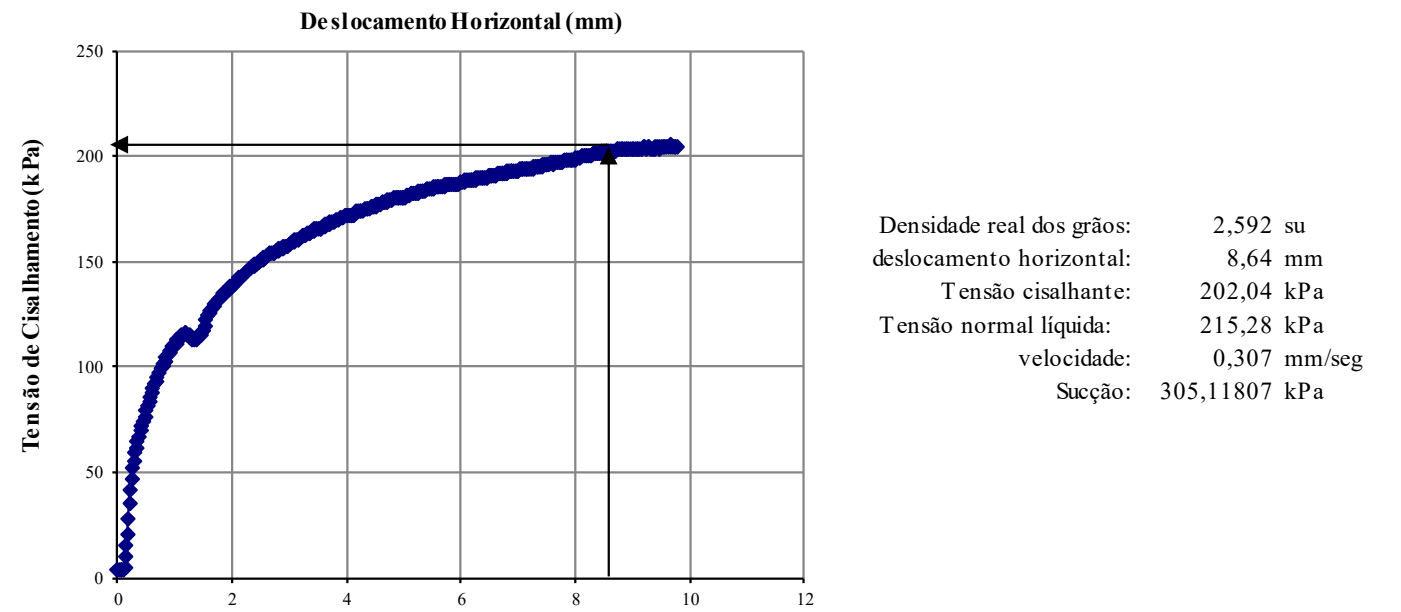
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 25

Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρ_w (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,0699	1,06812	106,9012	10,42613	206,084	340,65	1,652968404	1,345684	1,386336	0,926158	0,86968	63,9067865	57,32201898	19,23287	22,83478	30,72841	26,6632283
2	0,83734	0,71701	77,717559	22,9886	206,084	338,51	1,642584278	1,345684	1,386336	0,926158	0,86968	61,7471688	55,08958472	18,48384	22,063119	29,68999	25,6248157
3	0,4747	0,47146	47,307888	80,70696	206,084	336,74	1,633995539	1,345684	1,386336	0,926158	0,86968	59,9609429	53,24313208	17,86431	21,424876	28,83112	24,7659418



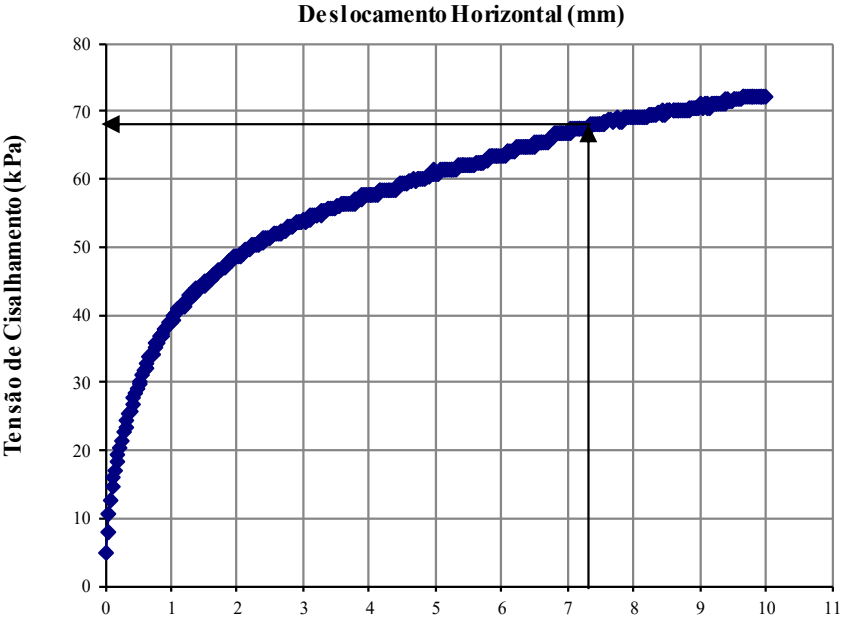
Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 5,53 mm
Tensão cisalhante: 240,18 kPa
Tensão normal líquida: 312,86 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 80,706955 kPa

Análise de Sucção - Residual de granito - solo 26																	
Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	ρw (g/cm³)	ρd umidade natural (g/cm³)	ρd umidade amolgada (g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	1,18807	1,12161	115,48418	8,608832	194,769	367,64	1,88756647	1,423365	1,430533	0,821036	0,81191	102,958558	101,9943255	31,94846	32,612933	46,42012	45,7033265
2	0,66153	0,60794	63,473483	37,9814	194,769	365,39	1,876014341	1,423365	1,430533	0,821036	0,81191	100,396328	99,41628214	31,14092	31,801326	45,2649	44,5481137
3	0,38194	0,37791	37,992453	305,1181	194,769	363,23	1,864924298	1,423365	1,430533	0,821036	0,81191	97,936586	96,94136054	30,36568	31,022184	44,1559	43,4391093



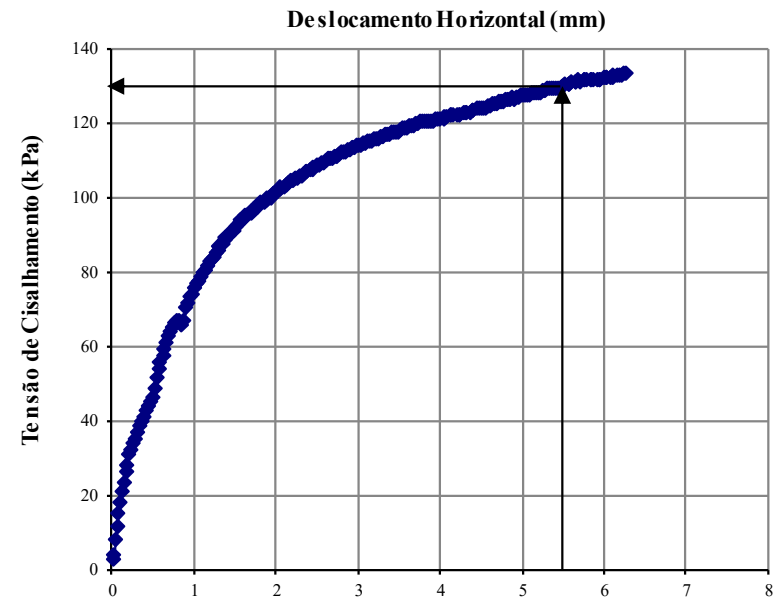
Análise de Sucção - Residual de granito - solo 27

Tentativas	Umidade do papel filtro 1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	0,88754	0,86415	87,584277	17,09162	197,676	281,48	1,423946255	1,048136	1,033938	1,472961	1,50692	63,0949202	64,88196711	37,72065	35,855076	37,581	39,0008192
2	0,53319	0,72559	62,939297	38,78589	197,676	279,27	1,412766345	1,048136	1,033938	1,472961	1,50692	61,2179199	63,02207133	36,63936	34,78843	36,46301	37,8828281
3	0,39315	0,37009	38,162143	297,8154	197,676	277,53	1,403964062	1,048136	1,033938	1,472961	1,50692	59,7401006	61,55771899	35,78802	33,948626	35,58278	37,0025999



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 7,25 mm
Tensão cisalhante: 67,48 kPa
Tensão normal líquida: 54,36 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 297,81537 kPa

Análise de Sucção - Residual de granito - solo 28																	
Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	0,89308	0,86364	87,835791	16,9705	205,361	343,23	1,671350478	1,239177	1,23613	1,091711	1,09687	82,8041383	83,20059177	35,20833	34,875833	43,21733	43,5220696
2	0,53984	0,52448	53,216019	58,80509	205,361	340,81	1,659566345	1,239177	1,23613	1,091711	1,09687	80,5463058	80,94783382	34,25502	33,924869	42,03892	42,3436563
3	0,3448	0,34482	34,480972	503,709	205,361	338,69	1,649243054	1,239177	1,23613	1,091711	1,09687	78,5683699	78,97434338	33,41989	33,091793	41,00659	41,3113272



Densidade real dos grãos: 2,592 su

deslocamento horizontal: 5,61 mm

Tensão cisalhante: 130,64 kPa

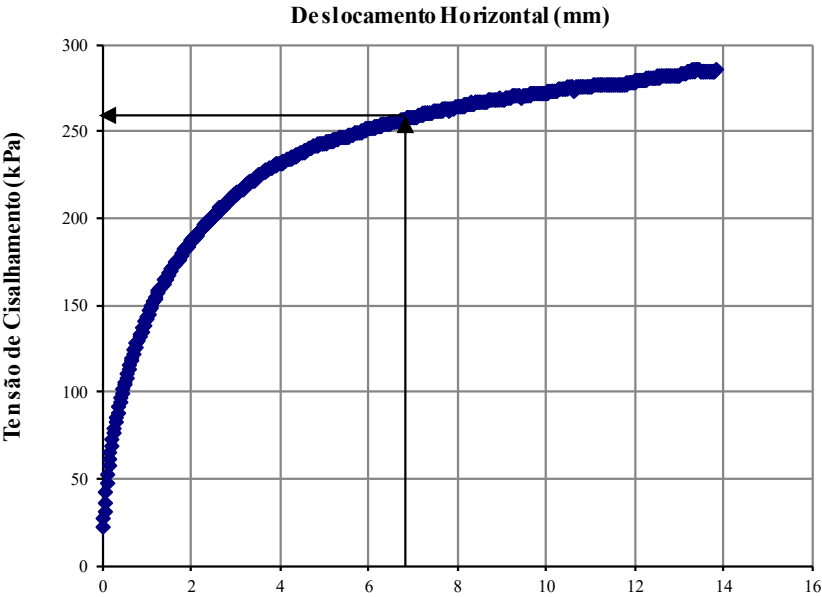
Tensão normal líquida: 106,39 kPa

velocidade: 0,307 mm/seg

Sucção: 503,70902 kPa

Análise de Sucção - Residual de granito - solo 29

Tentativas	Umidade do papel filtro1 (%)	Umidade do papel filtro 2 (%)	Umidade média do papel (%)	Sucção (kPa)	V (cm³)	Massa úmida (g)	pw (g/cm³)	pd umidade natural (g/cm³)	pd umidade amolgada(g/cm³)	e natural (su)	e amolgado (su)	Saturação natural (%)	Saturação amolgada (%)	W amolgada (%)	W natural (%)	Θ natural (%)	Θ amolgada (%)
1	0,95041	1,06174	100,6075	12,11928	206,474	352,9	1,709174036	1,292497	1,301779	1,00542	0,99112	83,1107587	81,84401824	31,2953	32,238139	41,6677	40,7395474
2	0,74681	0,57252	65,966852	34,52011	206,474	350,61	1,698083052	1,292497	1,301779	1,00542	0,99112	80,8985411	79,61588655	30,44331	31,380034	40,5586	39,6304489
3	0,37574	0,36479	37,026265	350,2447	206,474	348,99	1,690237027	1,292497	1,301779	1,00542	0,99112	79,3335663	78,03965366	29,84059	30,77299	39,774	38,8458465



Densidade real dos grãos: 2,592 su
deslocamento horizontal: 6,92 mm
Tensão cisalhante: 257,36 kPa
Tensão normal líquida: 317,56 kPa
velocidade: 0,307 mm/seg
Sucção: 350,2447 kPa

